

Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra telekomunikační techniky

Návrh meandrové antény pro RFID
Design of Meander Antenna for RFID Application

2018

Bc. Michal Chmiel

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Michal Chmiel**

Studijní program: N2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor: 2601T013 Telekomunikační technika

Téma: **Návrh meandrové antény pro RFID.**
Design of Meander Antenna for RFID Application.

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Cílem závěrečné práce je návrh a výroba antény pro radiofrekvenční identifikaci sledovaných předmětů. Podstatnou část práce tvoří simulace antény v programu CST Microwave Studio. Postup práce určují tyto hlavní zásady:

1. Seznamte se s anténní technikou pro aplikace RFID.
2. Navrhněte meandrovou anténu pro frekvenci 2,45 GHz.
4. Vyřešte připojení a impedanční přizpůsobení antény.
3. Proveďte simulaci antény v programu CST Microwave Studio.
5. Posuďte vliv substrátu.
6. Vyroberte anténu a ověřte její vlastnosti.

Seznam doporučené odborné literatury:

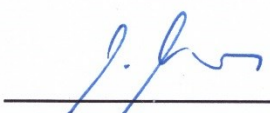
[1] Laheurte, J., Ripoll, Ch., Paret, D., Loussert, Ch.: UHF RFID Technologies for identification and Traceability, Wiley, 2014, ISBN 978-1-84821-592-4

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

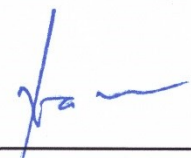
Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Lubomír Ivánek, CSc.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: 30. dubna 2018



podpis studenta

Poděkování

Rád bych poděkoval *doc. Ing. Lubomíru Ivánkovi, CSc.* za odbornou pomoc a konzultaci při vytváření této diplomové práce.

Abstrakt

Stěžejním záměrem této diplomové práce je vytvoření antény meandrového typu za účelem uplatnění v oblasti radiofrekvenční identifikace. Úvodní teoretická část práce zahrnuje obecný popis této technologie, její historii, výhody a nevýhody oproti jiným technologiím, které se zaměřují na identifikaci. Simulace jsou prováděny prostřednictvím programu CST MICROWAVE STUDIO. Velmi podstatná část práce je softwarová optimalizace a impedanční přizpůsobení meandrové antény. Testy byl objasněn vliv substrátu. Teorie mikropáskových antén popisuje mimo jiné i způsoby připojení antény k napáječi. Teoretické poznatky a výsledky simulací jsou uplatněny v praktické části, jež se zabývá vyhotovením reálného modelu meandrové antény. Jedná se o anténu realizovanou v pásmu ultra krátkých vln, konkrétně na kmitočtu 2,45 GHz.

Klíčová slova

Radiofrekvenční identifikace, RFID tagy, čipy, Mikropásková anténa, Meandrová anténa, CST MICROWAVE STUDIO.

Abstract

The main purpose of this diploma thesis is to design an antenna of meander-type for use in RFID. The initial theoretical part of the thesis includes general description of this technology, its history, advantages and disadvantages compared to other technologies which are focused on identification. Simulations and optimizations of the antenna are performed through the CST MICROWAVE STUDIO. Very important part of this thesis is software optimization and impedance matching of the meander antenna. Substrate influence was clarified by testing. The theory of microstrip antennas also describes how to connect antenna power supply. Theoretical knowledge and simulation results are applied in the practical part which follows up the producing of a real model of the meander antenna. Antenna is realized for ultra-high frequency band, specifically at the 2,45 GHz frequency.

Key words

Radio Frequency Identification, RFID tags, chips, Microstrip antenna, Meander antenna, CST MICROWAVE STUDIO.

Seznam použitých zkratek

Zkratka	Význam
ČZZ	Činitel zpětného záření
DPS	Deska plošného spoje
EAS	Electronic article surveillance
EEPROM	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory (elektronicky mazatelná programovatelná paměť určená pouze pro čtení)
EPC	Electronic product code (identifikační/sériové číslo tagu)
ETSI	European Telecommunications Standards Institute
FBR	Front to back ratio (předozadní poměr)
FCC	Federal Communications Commission
FEM	Finite element method
FIT	Finite Integration Technique
FRAM	Ferromagnetic random access memory
GTIN	Global Trade Identification Number
IFF	Identification friend or foe (identifikace přítel–nepřítel)
ISM	Industrial Scientific Medical band
MPT	Ministry of Posts and Telecommunications
PTFE	Polytetrafluorethylen – teflon
PSV	Poměr stojatých vln
RAF	Royal Air Force (Královské vojenské letectvo Spojeného království)
RFID	Radio Frequency Identification (Radiofrekvenční identifikace)
RTF	Reader talk first
SRAM	Static Random Access Memory
TTF	Tag talks first
UKV	Ultra krátké vlny
Wi-fi	Wireless Fidelity-komunikační standard pro bezdrátový přenos dat
WLAN	Wireless local area network
WORM	Write Once Read Many (paměť typu – zapiš jednou, čti mnohokrát)

Seznam použitých symbolů

Symbol	Jednotky	
ϵ_r	[-]	Relativní permitivita materiálu
$\epsilon_{r,ef}$	[-]	Efektivní permitivita prostředí
D_{max}	dBi	Zisk izotropního zářiče
D_{ref}	dBd	Zisk referenční antény
G_{abs}	[dBi]	Absolutní zisk
G_{rel}	[dBd]	Relativní zisk
h_D	[m]	Výška substrátu
I_{vst}	[A]	Vstupní proud
k	[-]	Součinitel zkrácení
L_0	[dB]	Ztráty šířením v RF kanálu
l_{el}	[m]	Délka elektrická
l_{mech}	[m]	Délka geometrická
R_{vst}	[Ω]	Odpor záření antény
R_{ztr}	[Ω]	Ztrátový odpor
S_{11}	[dB]	Parametr S_{11}
S_{tot}	[m]	Celková délka meandru
U_{vst}	[V]	Vstupní napětí
w_p	[m]	Šířka substrátu
X_{vst}	[Ω]	Vstupní reaktance
Z_{vst}	[Ω]	Vstupní impedance
ρ	[dB]	Koeficient odrazu
η	[%]	Účinnost antény
δ	[-]	Rozptylový faktor

Obsah

Úvod	- 14 -
1 RFID	- 15 -
1.1 Historie RFID	- 15 -
1.2 Základní koncepce.....	- 15 -
1.3 RFID tagy a jejich klasifikace	- 16 -
1.3.1 Dělení dle tvaru	- 16 -
1.3.2 Dělení dle způsobu napájení.....	- 17 -
1.3.3 Dělení dle možnosti zápisu do paměti	- 19 -
1.3.4 Dělení dle třídy	- 20 -
1.3.5 Dělení dle frekvenčního pásma	- 20 -
1.4 Standard EPC	- 22 -
1.5 Výhody a nevýhody oproti jiným technologiím.....	- 22 -
2 Antény využívané v oblasti RFID komunikací	- 24 -
2.1 Základní vlastnosti antén.....	- 24 -
2.2 Planární mikropáskové antény	- 27 -
2.2.1 Půlvlnný a meandrovaný dipól.....	- 30 -
2.3 Meandrová anténa	- 32 -
2.3.1 Substrát.....	- 33 -
2.3.2 Impedanční přizpůsobení a symetrizace.....	- 34 -
3 Návrh, modelování a simulace meandrové antény.....	- 37 -
3.1 O programu CST Microwave Studio.....	- 37 -
3.2 Návrh meandrové antény	- 38 -
3.3 Modelování meandrové antény v programu CST	- 39 -
3.4 Simulace	- 43 -
3.5 Výsledky simulací	- 44 -
3.6 Vliv materiálu substrátu	- 51 -
3.7 Vliv výšky a šířky substrátu	- 55 -
4 Praktická realizace meandrové antény	- 60 -
4.1 Výroba.....	- 60 -
4.2 Ověření správnosti návrhu antény měřením.....	- 61 -

4.3	Výsledky měření	- 62 -
4.3.1	Měření parametru S_{11} a PSV	- 63 -
4.3.2	Měření zisku reciproční metodou	- 66 -
Závěr	- 68 -
Použitá literatura	- 70 -
Seznam příloh	- 73 -

Seznam ilustrací a seznam tabulek

Číslo	Název ilustrace	Číslo stránky
1.1	Schéma typické architektury RFID systému	16
1.2	Různé varianty tagů – Smart label, klíčenka a implantát	17
1.3	Rozdělení RFID tagů dle způsobů napájení	19
1.4	Struktura EPC kódu	22
2.1	Směrová charakteristika směrové antény v horizontální a vertikální rovině	24
2.2	Ukázka určení šířky pásma	26
2.3	Základní koncepce elementární mikropáskové (patch) antény	28
2.4	Princip odvození rozměrů jednotlivých elementů zářiče	29
2.5	Napájení mikropáskových antén a) Pomocí vazební štěrbin b) Kapacitní vazbou c) Koaxiální sondou d) Mikropáskovým vedením	30
2.6	Půlvlnný dipól a rozložení napětí a proudu	31
2.7	Princip meandrování a jednotlivé délky l a s	31
2.8	Ukázka vybraných tvarů zářičů mikropáskových antén	32
2.9	Struktura symetrického mikropáskového vedení (stripline)	35
2.10	Struktura nesymetrického mikropáskového vedení (microstrip)	36
3.1	Přední a zadní náhled modelu č. 1 meandrové antény, výstup z CST	40
3.2	Detail modelovaného SMA konektoru typu Female Edge, výstup z CST	40
3.3	Technický náčrt modelu č. 1 meandrové antény s rozměry – 2D	41
3.4	Přední a zadní náhled modelu č. 2 meandrové antény, výstup z CST	42
3.5	Přední a zadní náhled modelu č. 3 meandrové antény, výstup z CST	42
3.6	Ukázka nastavení ohraničení okolí simulace	43
3.7	Parametr S_{11} prvotního návrhu meandrové antény	44
3.8	Parametr PSV prvotního návrhu meandrové antény	44
3.9	Náhled z prostředí CST – funkce optimizer	45
3.10	Změna velikosti zemnicí plochy, parametr „ g_h “	46
3.11	Závislost parametru S_{11} na změně výšky zemnicí plochy, parametr „ g_h “	46
3.12	Změna velikosti šířky úseku mikropásků, parametr „ λ “	46
3.13	Závislost parametru S_{11} na změně šířky úseku mikropásku, parametr „ λ “	46
3.14	Změna velikosti výšky úseku mikropásků, parametr „ bz “	47
3.15	Závislost parametru S_{11} na změně výšky přizpůsobovacího úseku mikropásků, parametr „ bz “	47

3.16	Graf parametru S_{11} návrhu meandrové antény po optimalizacích	48
3.17	Graf parametru PSV návrhu meandrové antény po optimalizacích	48
3.18	Graf šířky použitelného pásma meandrové antény po optimalizaci	49
3.19	Materiál ASTRA MT 77 - 3D vyzařovací diagram	50
3.20	Materiál ASTRA MT 77- Směrová charakteristika a) horizontální b) vertikální	51
3.21	Materiál FR4 – 3D směrová charakteristika	52
3.22	Materiál FR4 – Směrová charakteristika a) horizontální b) vertikální	52
3.23	Materiál Rogers 3003 – 3D směrová charakteristika	53
3.24	Materiál Rogers 3003 – Směrová charakteristika a) horizontální b) vertikální	54
3.25	Vliv testovaného materiálu na parametr S_{11}	55
3.26	Vliv testovaného materiálu na parametr PSV	55
3.27	Vliv změny šířky substrátu na parametr S_{11}	56
3.28	Vliv změny šířky substrátu na parametr S_{11}	56
3.29	Směrová charakteristika – změna šířky substrátu a) horizontální b) vertikální	57
3.30	Směrová charakteristika – změna šířky substrátu a) horizontální b) vertikální	57
3.31	Vliv změny výšky substrátu na směrovou charakteristiku a) horizontální b) vertikální	58
3.32	Vliv změny výšky substrátu na parametr S_{11}	58
3.33	Vliv změny výšky substrátu na parametr PSV	59
4.1	Detail konektorů - levnější varianta vlevo, v pravo varianta dražší	60
4.2	Náhled měřicího pracoviště – stanoviště č. 1	61
4.3	Označení jednotlivých vyrobených modelů	62
4.4	Kontrolní měření parametru S_{11} vyrobeného modelu č. 1	64
4.5	Kontrolní měření parametru S_{11} vyrobeného modelu č. 2	64
4.6	Kontrolní měření parametru S_{11} vyrobeného modelu č. 3	64
4.7	Kontrolní měření parametru PSV vyrobeného modelu č. 1	65
4.8	Kontrolní měření parametru PSV vyrobeného modelu č. 2	65
4.9	Kontrolní měření parametru PSV vyrobeného modelu č. 3	65
4.10	Bezodrazová stěna v laboratoři – stanoviště č. 2	66

Číslo	Název tabulky	Číslo stránky
3.1	Rozměry Meandrové antény pro model č. 1 – přední náhled	41
3.2	Rozměry Meandrové antény pro model č. 1 – zadní náhled	41

3.3	Shrnutí dosažených výsledků jednotlivých modelů po optimalizaci	49
3.4	Shrnutí výsledků změn materiálů substrátu a její dopad na sledované parametry při $f = 2,45$ GHz	54
4.1	Naměřené hodnoty PSV a S_{11} jednotlivých modelů	63

Úvod

Zkratka RFID pochází z anglického sousloví „Radio Frequency Identification“. Jedná se o tzv. čipovou identifikaci, která je založena na principu bezdrátového přenosu informace prostřednictvím elektromagnetických rádiových vln. Antény tedy tvoří základní stavební prvky této technologie. Celkově jsou v dnešní době značně rozšířené a jsou nedílnou součástí všech rádiových, vysílacích nebo přijímacích zařízení (systémů).

Systémy RFID se využívají zejména k bezkontaktní komunikaci na krátkou vzdálenost. Svou základní funkcionalitou jsou podobné technologii čárových kódů, které jsou doposud nejrozšířenějším způsobem identifikace. Technologie RFID přináší hned několik výhod a klade si za cíl rozšířit funkčnost a zjednodušit identifikaci případnou automatizací. Hlavním problémem jsou počáteční náklady na zavedení technologie.

Technologii této identifikace je možné aplikovat v nejrůznějších oborech a oblastech činnosti. Slouží především k identifikaci věcí, zvířat nebo lidí. Zjednodušují tak sledování oběhu zboží v obchodech, u transportů a logistiky. Zajišťují případné zabezpečení, umožňují efektivní sběr dat a eliminují chyby způsobené lidským faktorem.

Cílem práce je návrh meandrové antény za účelem využití v RFID. Jak již vyplývá z úvodní kapitoly, tato technologie je uplatňována v mnoha kmitočtových pásmech. Reálný návrh meandrové antény je však pevně stanoven pro využití v pásmu UKV (Ultra krátkých vln) na kmitočtu 2,45 GHz.

První úvodní část diplomové práce se zabývá objasněním problematiky RFID a její historií. Dále se zaměřuji na principy fungování tagů a jejich klasifikaci dle různých kritérií. Součástí úvodní kapitoly tvoří výhody a nevýhody RFID oproti jiným technologiím.

Další kapitola se zabývá problematikou antén, s ohledem na způsob využití v oblasti RFID. Nejprve jsou zde rozebrány pouze klíčové vlastnosti antén obecně. Část této kapitoly je věnována planárním mikropáskovým anténám, ze kterých vychází výsledný návrh meandrové antény. Rovněž je zde rozebrán rozdíl mezi meandrovaným a půlvlnným dipólem.

Třetí praktická část se již zabývá anténním návrhem v podobě výpočtu dílčích rozměrů a simulací. Anténa je navržena v simulačním prostředí CST Microwave Studio, kde je patřičně vyladěna a pro zlepšení výsledných parametrů následně optimalizována. Další části této kapitoly pojednávají o návrhu impedančního přizpůsobení, posouzení vlivu substrátu a o problematice vyřešení připojení antény k napáječi.

Závěrečná kapitola práce zahrnuje vyhotovení reálného modelu antény pro daný kmitočtový rozsah na základě výsledků simulací a poznatků převzatých z teorie. Začleňuji sem také dokumentaci a patřičný odborný komentář k praktické realizaci. Funkčnost antény je ověřena kontrolním měřením pomocí analyzátorů, které jsou dostupné ve školní laboratoři.

1 RFID

Je souhrnný obecný termín pro technologie, které využívají rádiových vln k identifikaci daných objektů.

1.1 Historie RFID

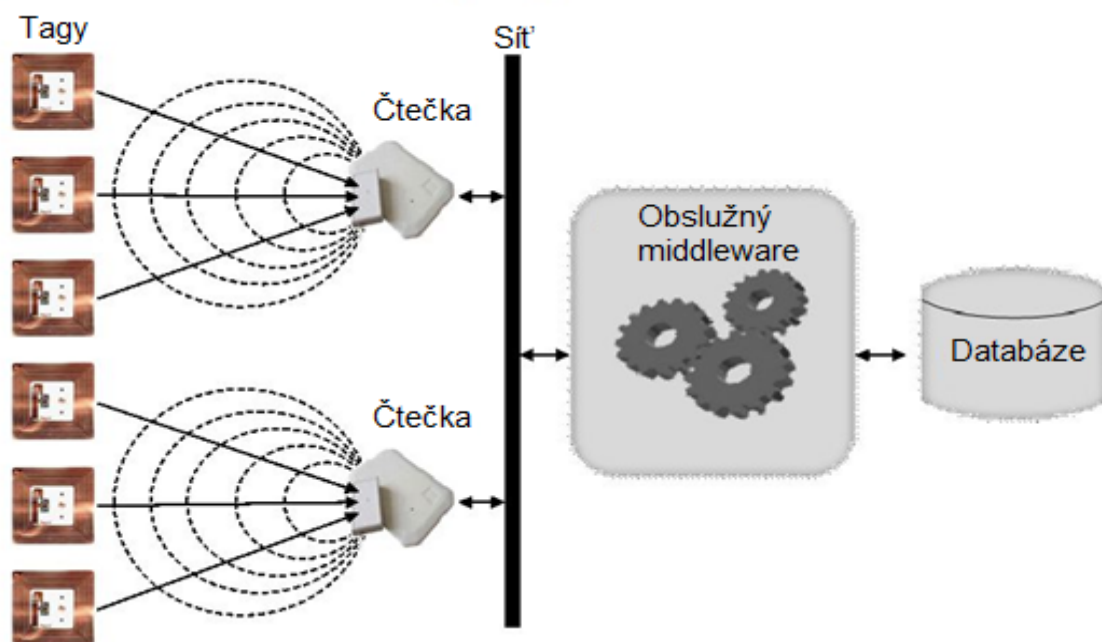
Tato technologie využívá elektromagnetické vlnění a související rádiové systémy. Můžeme tvrdit, že prvotní zmínky sahají desetiletí do minulosti již do dob Michaela Faradaye, Guglielma Marconiho, Alexandra Stěpanoviče Popova, Jamese Clerka Maxwella aj. Tedy do 19. století. Samotný koncept využití rádiového vlnění k odrazu vln od objektů se datuje do roku 1886, kdy prováděl experimenty Heinrich Rudolf Hertz. Postupně se dostáváme až k problematice dnešního radaru. Ten byl vynalezen roku 1935 skotským fyzikem, Sirem Robertem Alexanderem Watson-Wattem, který významně přispěl k objevu tohoto vynálezu. Od roku 1935 byl ředitelem základny RAF (Royal Air Force) v Suffolku, kde byl radar nakonec vyvinut a zkonstruován. Tehdy dokázal zaznamenávat letouny až na několik kilometrů. Britové zároveň vyvinuli první aktivní systém pro identifikaci přítele nebo nepřítele IFF (Identification friend or foe). V tomto případě se principiálně jednalo o pasivní využití RFID systému k identifikaci letadel. Na každý britský letoun byl umístěn vysílač, který reagoval na signál z radarové stanice. Při dopadu signálu na daný vysílač, začal vysílat signál zpět, na tomto základě identifikovali letadlo jako přátelské. Princip fungování RFID je obdobný. Signál je odeslán na transpondér (čip a anténa), který jej buď vrací zpět, nebo vysílá.

Před několika desetiletími stála u zrodu čárového kódu firma Wal-Mart. Patent na technologii RFID, která značně rozšiřuje možnosti identifikace na základě čárových kódů, získal vynálezce Charles Walton v roce 1983.

Nízkonákladové technologie RFID začaly být přijímány v maloobchodních a farmaceutických dodavatelských řetězcích v roce 2003, kdy Wal-Mart, největší světový prodejce, začal nasazovat pasivní systémy RFID v pásmu UKV v rámci svého obchodního skladu. Mezi mnohé, kteří začali využívat tuto technologii, patří například ministerstvo obrany Spojených států amerických a další obchodní řetězce, jako jsou Tesco a Target. [1] [2]

1.2 Základní koncepce

RFID systém obsahuje tyto základní komponenty: tagy, čtecí modul (jež se skládá z vysílače a přijímače). Informace je dále zpracována obslužným počítačem (middleware), který zajišťuje hromadnou komunikaci mezi všemi načtenými tagy v dosahu čtecích zařízení a řídí zpracování přenesených dat. Tagy, někdy označované jako transpondéry, obsahují kombinaci čipu a antény, případně jedná-li se o aktivní tagy, obsahují navíc i baterii. Schéma typické architektury RFID je popsáno na obr. 1.1. [2] [3]



Obrázek 1.1: Schéma typické architektury RFID systému [4]

1.3 RFID tagy a jejich klasifikace

Jedná se o finální provedení RFID prvku, který se skládá se ze tří částí: z antény (přijímače/vysílače), čipu s dekodérem a nosiče informace, tzv. transpondéru. Označení „transpondér“ vznikl spojením dvou slov, „transmitter“ a „responder“, tedy vysílač a odpovídač. Často se setkáme s provedením, kdy jsou čip a anténa spojeny. Ochrana před vnějšími vlivy a dlouhá životnost se odvíjí od způsobu zapouzdření tagu, jež může nabývat nejrůznějších forem. Většinou se provádí dle požadavků aplikace, pro kterou bývá navrhován. Existuje několik druhů čipů umístěných v RFID tagu. Tagy mívají nejrůznější fyzickou podobu, od samolepek přes čipové karty, přívěsky na klíče, náramky, až po tagy zabudované napevno a neoddělitelně od materiálu produktu, například implantáty. Každý RFID tag obsahuje své identifikační/sériové číslo, tzv. EPC (Electronic product code) kód. Kromě způsobu napájení můžeme RFID tagy rozčlenit dle používané frekvence, velikosti a přístupu do paměti. Jejich provedení se liší s ohledem na způsob a náročnost využití. [2] [3]

1.3.1 Dělení dle tvaru

Existuje mnoho tvarů RFID tagů, které se odvíjí od způsobů jejich aplikování. Od podkožních implantátů, odznaků, klíčenek po nejčastěji se vyskytující „smart labels“, neboli česky chytrých štítků. Jejich funkční vzdálenost se poté odvíjí od způsobu napájení a frekvenčního pásma, ve kterém pracují.

- **Smart label**

Tento štítek může být vyhotoven z velmi tenké vrstvy plastové fólie (substrátu) o tloušťce zhruba 0,1 mm. Anténní motiv se na substrát buď vyleptá, vytiskne speciální tiskárnou, eventuálně lze využít i metodu galvanického pokování. K anténě se dále umísťuje RFID čip. Velikost křemíkového čipu, a tedy celého transpondéru, je pouze 3×3 mm. Vysílače jsou často vestavěny do plastového pouzdra o velikosti $6 \times 1,5$ mm, patří mezi nejmenší RFID transpondéry dostupné na trhu. Celek se pak převede na samolepící štítek. Štítky (pasivní tagy) obsahují pouze své jedinečné identifikační číslo, jenž je spjato s daným objektem. Mimo jiné se v rámci kontroly a prevence před selháním kombinují společně s čárovými kódy. [5]

- **Klíčenky, odznaky, náramky aj.**

Mohou být použity pro udělení přístupu do zařízení nebo vyhrazených oblastí, monitorování osob atd. Také bývají součástí různých typů karet, od vstupních po bankovní. [6]

- **Implantáty**

Funkce implantátů je obecně založena na principu pasivních RFID čipů (bez obsahu baterie). A v závislosti na použitém kmitočtu umožňují velmi krátký dosah pro čtení - max. do 10 cm. Z tohoto hlediska není technologie implantátů vhodná pro sledování osob a zvířat v reálném čase. Jsou v miniaturním provedení srovnatelné s velikostí zrnka rýže. Oproti předchozí variantě jsou však bezpečnější, nemohou být totiž odcizeny nebo ztraceny. Proces identifikace je plně automatický a zjednodušený. Dochází k eliminaci čtecích problémů. Ty mohou být zapříčiněny nečistotami v případě čtečky otisků prstů nebo mrkáním při skenování oční duhovky atd. Další výhodou je, že uživatel implantátu bude identifikovatelný v bezvědomí i v případě chybějících dokladů totožnosti. [7] [8]

1.3.2 Dělení dle způsobu napájení

- **Pasivní**

V současné době jsou nejrozšířenějším typem, zejména díky svým nízkým výrobním nákladům a jednoduchosti, nenáročnosti na obsluhu a potřebné odolnosti. Z pohledu velikosti paměti jsou nejjednodušší, ta se pohybuje v rozsahu 64–256 bitů. Jsou využívány zejména v místech, kde není důležitá velká vzdálenost pro čtení. Tento typ čipu má delší životnost než aktivní a semiaktivní čipy, jelikož nevyužívá lokální baterii. Z důvodů absence vlastního zdroje energie je princip funkce založen na metodě RTF (Reader talk first). Tato metoda spočívá v přeměně energie rádiového signálu, jenž nabíjí napájecí kondenzátor, obdrženého z RFID čtečky na elektrický proud. Jinak řečeno, dokud pasivní tag nezachytí signál vyslaný čtečkou, nachází se v klidovém režimu. Z toho jasně vyplývá, že komunikace je podmíněna krátkou vzdáleností a velmi závisí na přenosovém prostředí, jenž tuto komunikaci může značně ovlivnit. Pracovní frekvence jsou 125 kHz, 13,6 MHz, 915 MHz a 2,45 GHz. V tomto případě s klesající frekvencí také rapidně klesá dosah tagu. Při hodnotě 125 kHz je dosah nižší, a to zhruba do 0,5 m. Větší funkční vzdálenosti dosahují tagy, které pracují na enormně vyšších frekvencích čili v pásmu UKV, kdy při efektivním izotropním vyzařovacím výkonu čtečky o velikosti 1 W

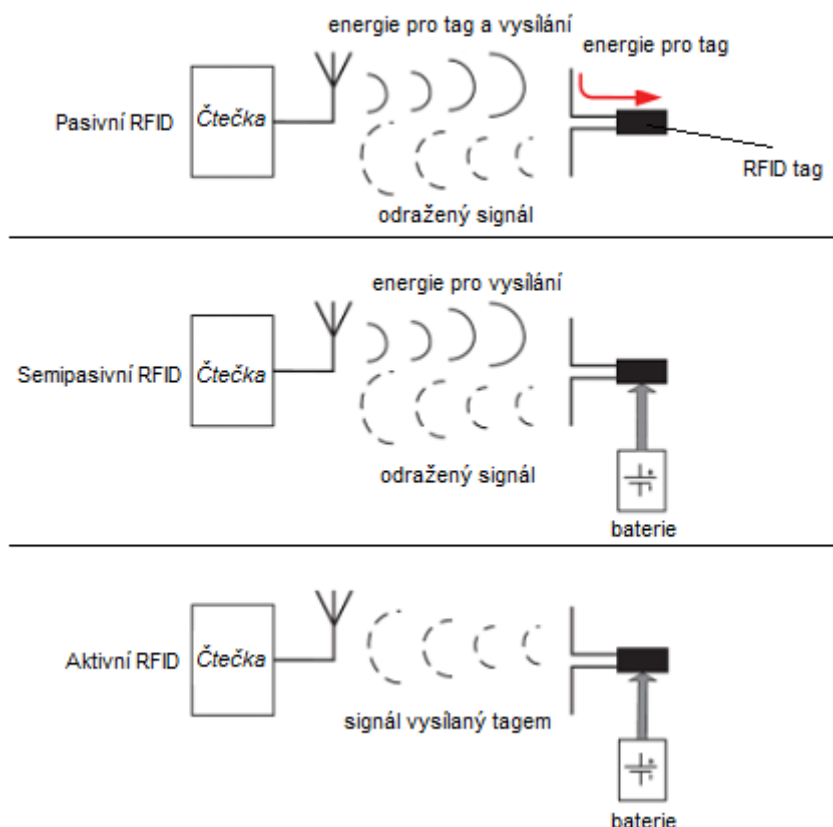
dosáhneme vzdálenosti okolo 3 m. Další nepříznivý faktor, jenž zde figuruje, je vícecestné šíření signálu. To způsobuje pokles výkonové úrovně pod požadované minimum, což je typicky hodnota nižší než -10 dBm. [9]

- **Aktivní**

S tímto typem tagů se setkáváme ve dvou základních provedeních. Mohou plnit funkci transpondéru (odpovídače) nebo majáku (beacon). Transpondér funguje na obdobném principu jako pasivní tag, aktivuje se v blízkosti čtečky a vyšle k ní data, která jsou na něm zapsána. Oproti tomu maják vysílá signál v nastavených časových intervalech. Pracovní frekvence, jež se zde uplatňují, jsou 455 MHz, 5,45 GHz a 5,8 GHz. Na rozdíl od pasivních tagů mohou také samy vysílat své údaje do okolí, a rovněž jsou schopny přijímat i signály s nižší výkonovou úrovní. Metodu komunikace označujeme jako TTF (tag talks first). Tento typ komunikace umožňuje vlastní napájecí zdroj (baterie) umístěn v čipu. Životnost baterie se pohybuje od 3 do 5 let, poté je nutno tag vyměnit. Ovšem díky interní baterii dokáže vysílat signál s vyšší výkonovou úrovní, tím se i značně zvýší funkční vzdálenost čtení. Při optimální velikosti a parametrech antény může být dosah i vyšší než několik set metrů. Rozměrově jsou daleko větší než tagy pasivní, jejichž velikost může být v podstatě téměř tak malá, jako již zmiňované zrnko rýže. Další nevýhodou jsou vyšší náklady a složitost výroby, od které se odvíjí i vyšší pořizovací cena. Využití mají zejména v oblastech ropného a plynárenského průmyslu, námořní, logistické, důlní a vysoce hodnotné výroby. [9]

- **Semi-aktivní a semi-pasivní**

Tyto čipy jsou zvláštním hybridem mezi aktivními a pasivními čipy. Jde víceméně o pasivní čip s vestavěnou baterií. Ta zde slouží buď pouze k napájení elektronických obvodů (semi-pasivní) nebo k napájení antény (semi-aktivní). Samotná komunikace (vysílací a přijímací proces) je opět napájena z energie čtečkou vyslaného radiového signálu. Výhodou je rychlejší odezva než u pasivních čipů a větší komunikační rozsah, protože čipy s baterií mohou vysílat signál s vyšší výkonovou úrovní. [10] [12]



Obrázek 1.3: Rozdělení RFID tagů dle způsobů napájení [12]

1.3.3 Dělení dle možnosti zápisu do paměti

Z obecného hlediska můžeme způsob zápisu informací do paměti rozdělit na:

- **Read-Only (jen pro čtení);**

Informace, jež jsou do nich uloženy, jsou programovány během výrobního procesu, poté do nich nelze jakkoliv zasahovat. Jejich součástí je unikátní sériové číslo EPC.

- **Read-Write (pro čtení a zápis);**

Tyto čipy jsou poměrně dražší než typy určené pouze pro čtení. Informace lze do čipu přidat, případně je měnit. Dále existují ještě čipy, které se označují jako **WORM** (Write Once Read Many). Do těchto čipů se informace uloží pouze jednou, poté se čip mění na: jen pro čtení.

Datové kapacity transpondérů se pohybují v rozmezí od několika bajtů až po několik kilobajtů. U přepisovatelných systémů s induktivní vazbou se vyskytují 3 typy pamětí. První a zároveň dominující je paměť **EEPROM** (Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory). Jedná se o elektricky mazatelnou paměť. Počet cyklů zápisu se pohybuje v řádech statisíců. Za jejich nevýhodu můžeme považovat vysokou spotřebu energie během operace zápisu dat.

Novější, méně využívanou variantou jsou **FRAM** (Ferromagnetic Random Access Memory) paměti. Technologie paměti FRAM přináší mnoho výhod. Jsou úspornější, pro svůj chod využívají velmi nízkého napětí. Z pohledu počtu cyklů a přenosové rychlosti zápisu a čtení, jež dosahuje 10 miliard použití, je její životnost téměř neomezena a rychlost téměř 25x vyšší než u EEPROM. Díky své odolnosti vůči radiaci a vyšším teplotám se využívají v oblasti lékařství. Uvedení na trh bohužel dosud brání složitost výroby.

Poslední v řadě jsou **SRAM** (Static Random Access Memory), které však pro svůj chod potřebují nepřetržitý zdroj energie z pomocné baterie. Z toho vyplývá i velká energetická náročnost. Jsou velmi rychlé (srovnatelně s FRAM), ale na úkor nízké velikosti kapacity. Paměťová buňka SRAM je realizována jako bistabilní klopný obvod, tj. obvod, který se může nacházet vždy v jednom ze dvou stavů, které určují, zda je v paměti uložena logická 0 nebo 1. Mezi jejich přednosti patří nízká přístupová doba (cca 15-20 ns) a přenosová rychlost. Stejně jako u FRAM paměti je překážkou vyšší složitost a z toho plynoucí vyšší výrobní náklady.

Často se vyskytuje varianta 1-bitového systému, který rozhoduje pouze mezi stavy logická 0 a 1. Pokud se v blízkosti nevyskytuje žádný transpondér nastaví se logická 0, logická 1 v opačném případě. Pro jednoduché aplikace jako signalizace a monitorování je tato funkčnost naprosto dostačující. Velkou výhodou je absence elektronického čipu, díky ní je výroba velmi jednoduchá a levná. Využívají se hlavně v kombinaci s EAS (Electronic Article Surveillance) jako ochrana před odcizením zboží. Princip je velmi jednoduchý; pokud se dotyčná osoba snaží opustit obchod s nezaplaceným zbožím (aktivním tagem), systém ho rozpozná jako hodnotu logická 1 (transpondér v poli) a obsluha je ihned upozorněna. Deaktivace nebo odstranění tagu probíhá při placení zboží. [5]

1.3.4 Dělení dle třídy

- **Třída 0 a třída 1:** Zde spadají pasivní tagy s pamětí sloužící pouze pro čtení, jsou navrhovány tak, aby náklady na jejich výrobu byly co nejnižší. Obsahují pouze jedinečný identifikátor.
- **Třída 2:** Pasivní tagy s pamětí do 65 KB rozšířenou o funkci zápisu a šifrování.
- **Třída 3:** Semi-pasivní RFID tagy s pamětí do 65 KB. Kombinují pasivní komunikaci s vestavěnou baterií, která zvyšuje čtecí vzdálenost.
- **Třída 4:** Širokopásmové aktivní tagy využívající komunikaci typu peer-to-peer, tj. schopnost komunikace v síti s ostatními aktivními tagy, které pracují na stejném kmitočtu.
- **Třída 5:** Jedná se v podstatě o čtečky, jež jsou schopny napájet třídy 1, 2 a 3 a komunikovat s třídou 4 a mezi sebou samými. [10]

1.3.5 Dělení dle frekvenčního pásma

Z pohledu komunikace můžeme RFID rozdělit na komunikaci v blízkém a vzdáleném poli, přičemž zde záleží na použité frekvenci. Pracovní frekvence je dalším z hlavních charakteristických vlastností těchto systémů. Těch je zde využíváno hned několik. Při takovémto

návrhu musíme zohlednit pro jaký typ aplikace bude systém navržen a v které části světa se RFID využívá. Z tohoto výběru pak vyplývá řada omezení, mezi které patří například komunikační dosah, velikost antény, celková velikost tagu, rychlost čtení a zápisu, pronikání vln různým prostředím a v neposlední řadě také interference a působení vnějších vlivů, jež značně ovlivňují úroveň signálu. Úroveň vysílacích výkonů a šířky pásma jsou spravovány pro jednotlivé oblasti. Ve Spojených státech se o regulaci a správu stará organizace FCC (Federal Communications Commission), v Evropě ETSI (European Telecommunications Standards Institute) a MPT (Ministry of Posts and Telecommunications) v Japonsku. [13]

- **Komunikace v blízkém poli**

NF (Nízko frekvenční)

Jedná se o rozsah 9–135 kHz, jejich čtecí (komunikační) dosah se pohybuje okolo 0,2 až 0,5 m (dle podmínek). Do této kategorie spadají tagy pasivní se zabudovanými čipy. [13] [14]

VF (Vysoko frekvenční)

Jedná se o LC rezonanční obvody. Obecně celosvětově nejpoužívanější je kmitočet 13,56 MHz ve značně rušeném pásmu ISM (Industrial Scientific Medical band). Čtecí dosah se pohybuje do vzdálenosti cca 1 m. Oproti NF se vyznačují vyšší přenosovou rychlostí a dosahem. Řadíme zde skupinu semi-pasivních tagů bez čipů. K přenosu informací se využívá induktivní vazby mezi anténami. Hlavním nositelem informace je tedy magnetické pole. Z důvodu vyššího čtecího dosahu se v poslední době začínají prosazovat tagy pracující v pásmu UKV. [10] [13] [14]

- **Komunikace ve vzdáleném poli**

UKV a Mikrovlny

Pro frekvence vyšší než 100 MHz se využívají dipólové antény a přenos elektromagnetickou vlnou. Používané frekvence v pásmu UKV (860 až 960 MHz) nejsou celosvětově jednotné, například v Evropě je hodnota kmitočtu 868 MHz, v USA a Kanadě zase 915 MHz. U těchto frekvencí se využívá šíření elektromagnetického pole ve volném prostředí. Čtecí dosah do cca 3 m lze dosáhnout v konfiguraci bez baterie. V případě systému s baterií vzdálenost dosahuje až 15 m a více. U mikrovln (2,4–6 GHz) se výrazně projevuje elektromagnetické rušení jinými systémy jako jsou Bluetooth a Wi-Fi (Wireless Fidelity), jež pracují na obdobném kmitočtu 2,4 GHz. Dále také přítomnosti látek jako jsou kovy a tekutiny aj. Tato frekvence se využívá s aktivními RFID transportéry. Využívají se například pro identifikaci vozidel a pohybujících se předmětů. [13] [14]

Mimo výše uvedené standardizované frekvence se však v některých případech (spíše sporadicky) využívají i některé další frekvence ve volném pásmu ISM:

- Vysokofrekvenční 6,78 MHz, 27,125 MHz,
- velmi vysokofrekvenční 40,68 MHz, 433 MHz,
- mikrovlnné 5,8 GHz a 24 GHz.

1.4 Standard EPC

Jedná se o elektronický kód produktu, který poskytuje celosvětově jedinečnou identitu určitého fyzického objektu. Identifikační číslo je uloženo do paměti čipu tagu. Velikost EPC je různá, nejčastěji se vyskytující jsou hodnoty 64, 96, 128, 240, 480 a 496 bitů. Počet možných kombinací značně překračuje limit čárových kódů, u kterých se využívá kódu zvaného GTIN (Global Trade Identification Number). EPC kód navíc obsahuje sériové číslo, dle kterého je osoba schopna odlišit například dva stejné produkty. Počet různých kombinací by stačil pro označení veškeré populace na planetě, a ještě každého fyzického objektu na planetě. Struktura EPC kódu se nachází na obr. 1.4.

Základní formát o velikosti 96 bitů se skládá ze čtyř hlavních částí obsahující řetězec čísel a písmen.

- **Header:** Hlavička obsahující údaje o délce, typu, verzi a generaci EPC.
- **EPC Manager:** Identifikace vydavatele tagu-organizace.
- **Object Class:** Jednoznačná identifikace druhu položky.
- **Serial Number:** Sériové číslo produktu. [10]

Header 8 bitů	EPC Manager 28 bitů	Object class 24 bitů	Serial Number 36 bitů
--------------------------------	--------------------------------------	---------------------------------------	--

Obrázek 1.4: *Struktura EPC kódu*

1.5 Výhody a nevýhody oproti jiným technologiím

Technologie RFID nabízí ve srovnání s levnějšími variantami, jako jsou například čárové kódy, hned několik výhod i nevýhod.

• Výhody

Mezi hlavní výhody řadíme snadnost komunikace mezi tagy a čtečkami. Oproti čárovým kódům, kde je nutno dodržet přímou viditelnost, zde není podstatné, jakým způsobem je tag orientován či namířen.

Běžné čárové kódy umožňují, až na výjimky, čtení v rozsahu pár centimetrů až jednoho metru. Čtení RFID tagů lze omezit nebo posílit nastavením výkonu a zvolením vhodné pracovní frekvence antény v rozmezí od několika cm až na 10 m a více.

Další z charakteristických vlastností jsou rychlost čtení a možnost ukládání dat. Čárové kódy načítáme postupně jeden za druhým, kdežto tagů můžeme klidně načíst několik set za zlomek vteřiny. U aktivních variant tagů s pamětí pro čtení a zápis lze uložené informace měnit (aktualizovat), přidávat či odebírat, a hlavně šifrovat nebo zabezpečit heslem. Běžný čárový kód lze bez problému zkopírovat, vyměnit nebo poškozením znehodnotit. To nás přivádí k dalším klíčovým atributům, jimiž jsou odolnost a životnost.

Tagy o miniaturní velikosti lze snadno umístit do předmětu, čímž se zajistí potřebná odolnost. Celkově je návrh uzpůsoben náročnějším podmínkám, spíše odolává vyšším teplotám, tlakům a chemickým vlivům. [15] [16] [17]

V odvětví logistiky a obchodu může technologie RFID napomáhat ke snížení nákladů na zaměstnance, protože umožňuje efektivní řízení zásob a snadnou a rychlou lokalizaci jednotlivých objektů. Snižuje tak pracovní sílu a eliminuje chyby generované lidským zaviněním. Z hlediska bezpečnosti se snižují možnosti krádeže produktu zákazníky i zaměstnanci. [15] [17]

- **Nevýhody**

Pořizovací náklady jsou jedním z důvodů, jež omezují rozsáhlé využití v oblastech spotřebního zboží, kde se stále uplatňují levnější čárové kódy. Proto se dnes používají v omezeném množství zejména u objektů a zboží vyšších hodnot.

Další nevýhodou je rušení jinými rádiovými systémy, jež pracují ve stejných frekvenčních pásmech jako systémy RFID. Problémů spojených s přenosem signálů je celá řada, zejména v případě využití v pásmu UKV. Se zvětšující se komunikační vzdáleností dochází k vyšším útlumům signálu a jeho deformaci. K deformaci a útlumu signálu, který se šíří tzv. povrchovou vlnou, dochází často vlivem vícecestného šíření, Dopplerova jevu, polarizačních ztrát, zastínění a přítomnosti elektricky vodivých prvků podél trasy jeho šíření. [1] [15] [16] [17]

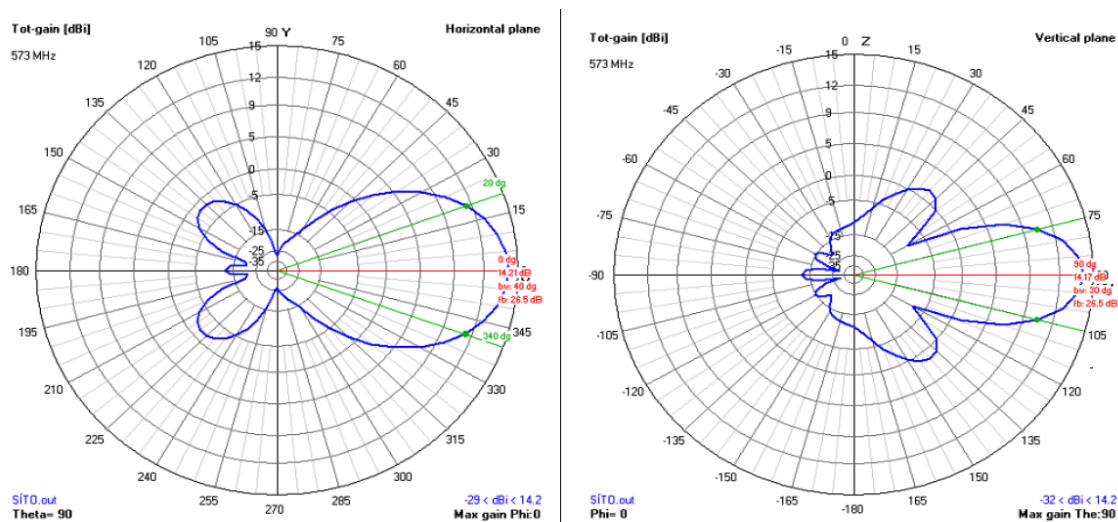
2 Antény využívané v oblasti RFID komunikací

2.1 Základní vlastnosti antén

Mezi nejvýznamnější parametry antén patří jejich směrová charakteristika, impedanční přizpůsobení, polarizace, šířka pásma, účinnost antény a její zisk.

- **Směrová charakteristika**

Anténa je zařízení reciproké, tudíž platí, že **směrová charakteristika** se vztahuje jak k vysílací, tak k přijímací straně a udává grafické vyjádření směrových vlastností. Vyjadřujeme je ve formě absolutní hodnoty podílu elektrické intenzity vyzařovaného vlnění v daném směru a nejvyšší hodnoty intenzity vyzařovaného vlnění. Vyzařovací diagram je trojrozměrný, avšak v praxi se ve většině případů znázorňuje jednorozměrným prostorovým řezem ve vertikální nebo horizontální rovině. Diagram je rozdělen do několika laloků (hlavní, vedlejší, postranní, zpětný). Z tohoto diagramu se určuje velmi důležitý parametr s názvem úhel záření antény. Je to úhel mezi dvěma hodnotami v hlavním laloku, které odpovídají poklesu intenzity pole o 3 dB. Jednotlivé prostorové řezy směrové antény lze spatřit na obr. 2.1. [18] [19] [20]



Obrázek 2.1. Směrová charakteristika směrové antény v horizontální a vertikální rovině [21]

- **Předozadní poměr**

Předozadní poměr souvisí se směrovou charakteristikou. Také se označuje jako ČZZ (činitel zpětného záření) nebo v anglické literatuře FBR (Front to Back Ratio nebo F/B). Je to poměr mezi maximální intenzitou ve směru záření a maximální intenzitou v opačném (nežádoucím) směru. Předozadní poměr se udává stejně jako zisk v jednotkách dB. [18]

- **Zisk antény**

Zisk antény charakterizuje její účinnost. Udává decibelové vyjádření maximální hodnoty činitele směrovosti. To znamená zisk vztažený k určitému referenčnímu zářiči. Pokud je zářič izotropní, mluvíme o absolutním zisku. Hodnotu zisku vyjadřujeme jako logaritmus poměru napětí nebo výkonů získaných z měření mezi zkoumanou a referenční anténou. Můžeme jej vyčíst ze vztahu pro absolutní zisk viz vzorec 2.1.

$$G_{abs} = 10 \log (D_{max}) [dBi] \quad (2.1)$$

Dále pak můžeme hovořit o **relativním zisku**, který se porovnává k referenční anténě (ve většině případů je použit půlvlnný dipól). Určuje, kolikrát větší napětí naměříme na svorkách směrové antény než na svorkách vztažné antény.

$$G_{rel} = 10 \log (D_{max} D_{ref}) [dBd] \quad (2.2)$$

Vztah pro převod jednotek dBi a dBd (viz níže). [18] [20]

$$G [dBi] = 2,15 + G [dBd] \quad (2.3)$$

- **Účinnost antény**

Účinnost antény charakterizuje poměr vyzářeného výkonu k výkonu přivedenému, jež můžeme vyčíst z níže uvedeného vztahu:

$$\eta = \frac{R_{vst}}{R_{vst} + R_{ztr}} \quad (2.4)$$

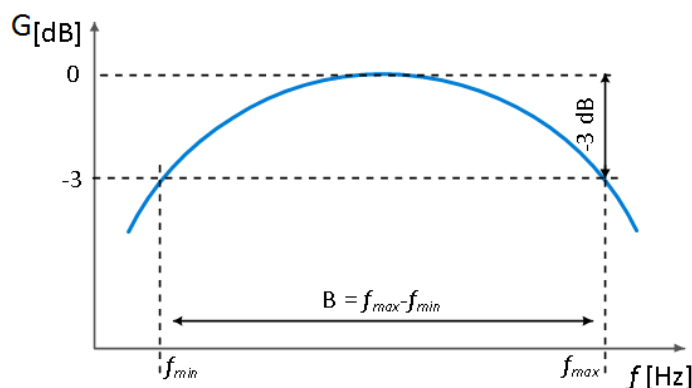
R_{vst} je odpor záření, vztažený ke vstupnímu proudu, R_{ztr} je ztrátový odpor antény, vztažený ke vstupnímu proudu. Účinnost se vypočítá jako podíl odporu záření a součtu odporu záření a ztrátového odporu. Dobrá účinnost antény je podmíněna buď malým ztrátovým odporem, nebo velkým odporem záření. Antény s malým odporem záření mívají nízkou účinnost. Při výpočtu účinnosti vyzařování uvažujeme bezetrátovou anténu (R_{ztr} je nulový). Pak je účinnost vyzařování dána poměrem činného výkonu vyzářeného anténou a činného výkonu na napájecí svorce zářiče (antény). [18]

- **Polarizace**

Představuje další podstatný faktor při výběru a instalaci antény. Zpravidla se snažíme, aby prostorová orientace byla vždy stejná jako polarizace přijímané vlny. Pokud jsou různé, dochází k značnému útlumu přijímaného signálu a hovoříme o tzv. polarizačním nepřizpůsobení. Polarizace se používají vertikální či horizontální, známe ale také například polarizaci kruhovou aj. [18]

- **Šířka pásma**

Jedná se o rozsah frekvencí, při kterých se anténa chová vzhledem k daným veličinám standardním způsobem. Podstatné základní parametry antény, jako jsou zisk, vstupní impedance, směrová charakteristika, polarizace aj., vždy souvisí s její konstrukcí. Jednotkou šířky pásma je Hz. Šířka pásma je vymezena minimálním a maximálním kmitočtem (f_{min} a f_{max}). Její rozptyl určuje pokles o -3 dB vůči maximální hodnotě šířky pásma. [18]



Obrázek 2.2: Ukázka určení šířky pásma [18]

- **Impedanční přizpůsobení antény**

Je to jeden z nejdůležitějších parametrů při výrobě antény. V nejlepším případě se jedná o stav, ve kterém nedochází na vedení k odrazu vln a přenos energie je maximální. Cílem impedančního přizpůsobení je dosáhnout stejných hodnot impedance vedení a vstupní impedance antény. V tomto případě nedochází ke vzniku stojatého vlnění. Přizpůsobení realizujeme pomocí přizpůsobovacích obvodů, kterých je celá řada, viz kap. 2.3.2. Přizpůsobený systém je takový, v němž anténa, vedení a zátěž pracují na shodné impedanci. Tímto způsobem bude anténa přizpůsobena pouze v omezeném (požadovaném) kmitočtovém rozsahu. Vstupní činitel odrazu a poměr stojatých vln úzce souvisí s impedančním přizpůsobením antény. [18]

- **Vstupní impedance**

Vstupní impedance je veličina, kterou bychom naměřili na vstupních svorkách antény. Představuje poměr napětí (U_{vst}) a proudu (I_{vst}) na vstupu antény. Vstupní impedance u lineárních antén je dána poměrem fázorů vstupního proudu a napětí. Vztah 2.5 má omezenou platnost, jelikož odpor záření je vztažen k vstupním svorkám a ty nemusí být nutně v amplitudě proudu. Ztrátový odpor je způsoben konečnou vodivostí stavebního materiálu antény, ve kterém dochází ke ztrátám. Vstupní činný odpor se skládá ze ztrátového odporu a vyzařovacího odporu. Odpor záření je odpor, který klade anténa elektromagnetické vlně v průběhu vyzařování. Hodnota X_{vst} je vstupní reaktance antény, která ztěžuje přizpůsobení antény, zejména když dosahuje vyšších hodnot. Pak je příčinou značných ztrát v přizpůsobovacích obvodech. [18]

$$Z_{vst} = \frac{U_{vst}}{I_{vst}} = R_{vst} + jX_{vst} [\Omega] \quad (2.5)$$

$$R_{vst} = R_{vyz} + R_{ztr} [\Omega] \quad (2.6)$$

- **Parametr S_{11}**

Parametr vyjadřuje vstupní činitel odrazu, jenž se uvádí ve formě útlumu odrazu v jednotkách dB nebo jako bezrozměrná veličina. V případě ideálního přizpůsobení by byl činitel odrazu roven nule a veškerá energie přenesená do antény by byla vyzářena nebo spotřebována na ztráty, ideální hodnota v dB by měla nabývat co nejvyšších záporných hodnot. Přijatelná hodnota je menší než -12 dB. U planárních typů antén až -10 dB. Energie odražené vlny je v ideálním případě nulová. Vztah pro výpočet viz (2.7) níže: [23]

$$S_{11} = 20 \log (\rho) \quad (2.7)$$

- **Parametr PSV**

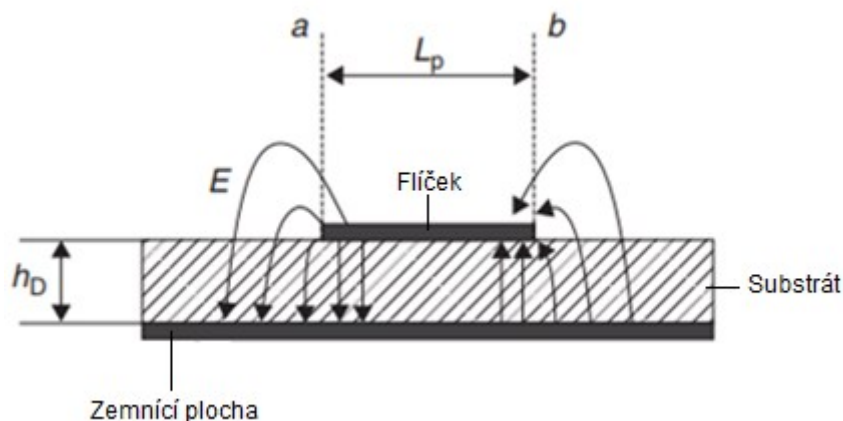
Jedná se o parametr, dle kterého lze určit kvalitu impedančního přizpůsobení. Zkratka PSV (Poměr Stojatých Vln) zahrnuje celý anténní systém včetně napáječe. Jeho cílem je dosáhnout, aby mezi vstupní impedancí antény a vlnovou impedancí připojeného vedení platila rovnost. Při těchto ideálních podmínkách bude PSV 1 : 1. Jedině tehdy dochází k maximálnímu přenosu energie mezi vedením a zátěží. Nerovnost těchto impedancí způsobuje odraz VF (vysokofrekvenční) energie od zatěžovací impedance. Na vedení dochází ke vzniku stojatých vln, což se projeví jako pokles přenesené energie i zkreslení přenášené informace. Za ideální stav můžeme považovat nízké hodnoty PSV zhruba 1,1 : 1 až 1,2 : 1, zejména u náročnějších přenosů se složitou širokopásmovou modulací (TV, radiolokace, telefonní multiplex aj.). Vysílací antény se zpravidla konstruují tak, aby PSV bylo $\leq 2 : 1$. U antén přijímacích jsou přijatelné hodnoty $PSV \leq 1,6 : 1$ až $4 : 1$. [24]

2.2 Planární mikropáskové antény

Tento typ antén je v současnosti velmi rozšířen, zejména díky jednoduché reprodukovatelnosti a nízké výrobní ceně. V anglické literatuře se často setkáme s velmi oblíbeným typem vyhotovení pod názvem „patch antenna“. Jsou vyráběny stejnou technologií jako plošné spoje, tudíž vynikají velice nízkým profilem a malou hmotností. Jejich využití se nachází zejména v drobné elektronice a mobilních telefonech. Pracovní kmitočet se většinou pohybuje v pásmu stovek MHz až desítek GHz, přičemž zpravidla nepřekračuje hodnotu 30 GHz. Mikropáskové antény o velmi malých rozměrech lze velice snadno integrovat přímo do mikrovlnných obvodů založených na mikropáskové technologii. Tím se celkový koncept velmi zjednoduší, protože eliminujeme nutnost využití symetrizačních členů a zároveň dojde k snížení vložného útlumu způsobeného vedením, nepřesným pájením a konektory. Hlavní nevýhodou těchto antén bývá jejich úzkopásmovost, nižší zisk a omezená výkonová zatížitelnost. Jednou z možností docílení lepších parametrů této antény je varianta se spodní (vodivě) souvisle pokovenou vrstvou. Toto vylepšení částečně plní funkci reflektoru, a tak omezením vyzářování

z dolní strany zvyšujeme směrovost antény a zároveň její zisk v žádoucím směru. Účinnost antén se pohybuje zhruba v rozmezí od 35 do 90 %. [18] [25]

Na obrázku 2.3. vidíme schéma elementární mikropáskové antény. Anténa je v rezonanci, pokud je fázový rozdíl 180° mezi okraji v místech bodu a a b . U těchto bodů na vstupním a výstupním okraji je znázorněn směr siločár elektrického pole. Tyto okraje se poté chovají jako dvě antény vyzařující ve fázi. Polarizace antény je lineární a je rovnoběžná s paralelní podélnou hranou L_p . Vzhledem k typu zdroje napájení je jedno z možných využití antény generování kruhové polarizace. [18] [25] [26]



Obrázek 2.3: Základní koncepce elementární mikropáskové (patch) antény [5]

Délka zářiče L_p určuje rezonanční kmitočet antény. Za podmínky, že parametr h_D (tloušťka substrátu) bude stejně velká nebo menší než vlnová délka λ , platí vztah:

$$L_p = \frac{\lambda}{2} - h_D \quad (2.8)$$

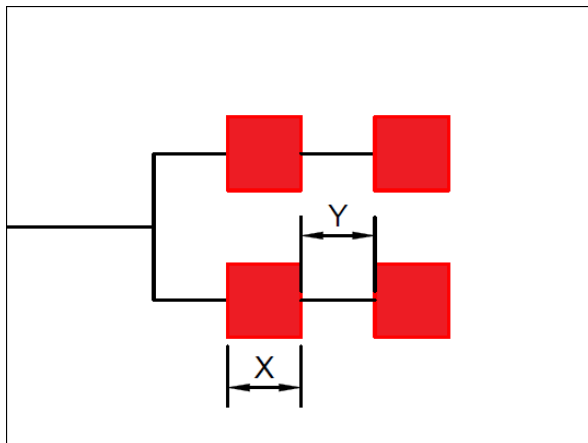
Tloušťka substrátu se obvykle pohybuje v rozmezí 1–2 % velikosti vlnové délky. Šířka substrátu označovaná w_p ovlivňuje rezonanční kmitočet jen mírně. Ovšem slouží k výpočtu odporu záření antény R_{vst} . Pokud je šířka $w_p < \frac{\lambda}{2}$, platí vztah:

$$R_{vst} = \frac{90}{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + (\epsilon_r - 1) \sqrt{4 + \frac{48 \times h_D}{w_p}}} \times \left(\frac{\lambda}{w_p} \right)^2 [\Omega] \quad (2.9)$$

Při šířce $w_p > \frac{3\lambda}{2}$ platí vztah:

$$R_{vst} = \frac{120}{\frac{\epsilon_r + 1}{2} + (\epsilon_r - 1) \sqrt{4 + \frac{48 \times h_D}{w_p}}} \times \frac{\lambda}{w_p} [\Omega] \quad (2.10)$$

K dosažení lepších parametrů (ziskovosti) se často antény o půlvlnné délce $X = \frac{\lambda}{2} - h_D$ (viz obr. 2.4) shlukují do skupin s mezerou $Y = \frac{\lambda}{2} + h_D$, tato vzdálenost dá dohromady přesně vlnovou délku λ , což zajišťuje fázovou shodu.

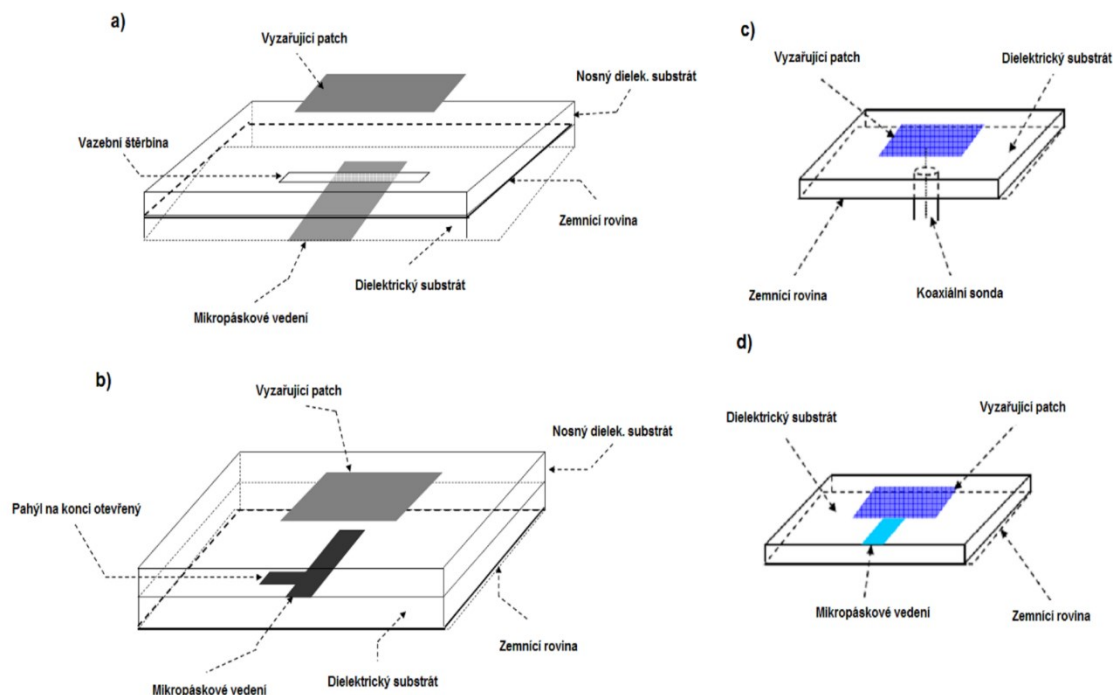


Obrázek 2.4: *Princip odvození rozměrů jednotlivých elementů zářiče* [5]

- **Způsob napájení mikropáskových antén**

Tyto antény jsou napájeny buď přímo nebo nepřímo. Varianta s tzv. přímým napájením se skládá z mikropáskového, popř. koaxiálního vedení. Nejjednodušší variantou je vyleptání mikropásku (budícího prvku) společně se zářičem. Velmi často se mikropásky (krátké části vedení) využívají jako impedanční filtry. Oproti koaxiálním kabelům jsou nepružné a pro vyšší kmitočty je nutné je doplnit o stínění. U koaxiální sondy vnitřní vodič prochází otvorem v zemní rovině směrem do dielektrického substrátu, poté je připojen k mikropáskovému anténnímu prvku. Vodiivé opletení připojujeme k zemnicí rovině. Výhodou tohoto složitějšího uzpůsobení oproti mikropáskovému vedení je, že nedochází k parazitnímu vyzařování napájení, které může zapříčinit deformaci směrové charakteristiky antény a tím velmi značně ovlivnit výsledné anténní parametry. [18] [25] [27]

Další dva způsoby jsou tzv. nepřímé a jsou zprostředkovávány prostřednictvím vazby elektromagnetickým polem. Tento způsob napájení umožňuje galvanické oddělení napájecího obvodu od antény, které zlepšuje anténní vlastnosti, zejména impedanční přizpůsobení a šířku pásma. Jedná se o vazební štěrby a vazby s otevřeným koncem napájecího vedení. Dílčí způsoby jsou vyobrazeny na obr. 2.5. [18] [25] [26] [27]

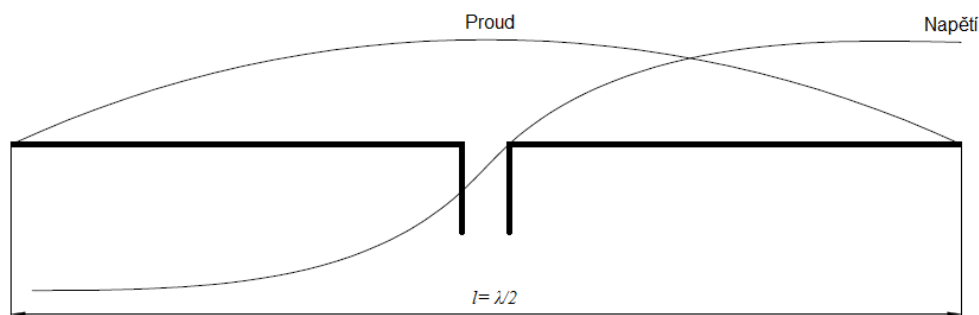


Obrázek 2.5: Napájení mikropáskových antén a) Pomocí vazební štěrbiny b) Kapacitní vazbou c) Koaxiální sondou d) Mikropáskovým vedením [28]

2.2.1 Půlvlnný a meandrovaný dipól

• Půlvlnný dipól

Základní typ rezonanční antény je zářič o půlvlnné délce. Chová se jako rezonanční obvod a jeho rezonanční kmitočet nastavujeme za pomoci délky zářiče. Je-li délka dipólu kratší než délka rezonanční, má vstupní impedance kapacitní charakter. Pokud je delší, má charakter induktivní. Pro dosažení rezonance musíme tedy délku vodiče zkracovat. Zde zavádíme koeficient zkrácení. Ten udává, kolikrát je potřeba zkrátit fyzickou délku $\lambda/2$, aby bylo dosaženo rezonanční délky elektrické $\lambda/2$. Činitel zkrácení ve zvoleném pásmu UKV se pohybuje zhruba kolem hodnot 0,9–0,95 a klesá s rostoucím průměrem anténního vodiče. Současně s rostoucí tloušťkou zářiče klesá jeho vstupní impedance. Zavádíme zde poměr l/d , ten reprezentuje poměr mezi délkou a průměrem zářiče. S klesajícím poměrem l/d se zlepšuje širokopásmovost zářiče. Rozložení proudu a napětí na půlvlnném dipólu je znázorněno na obr. 2.6. [29]

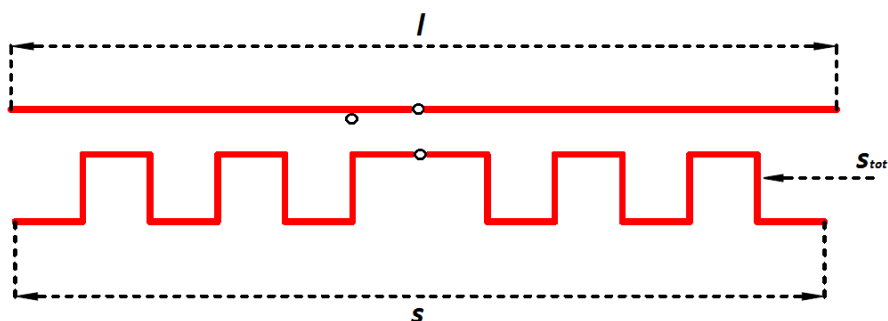


Obrázek 2.6: Půlvlnný dipól a rozložení napětí a proudu [22]

- **Meandrováný dipól**

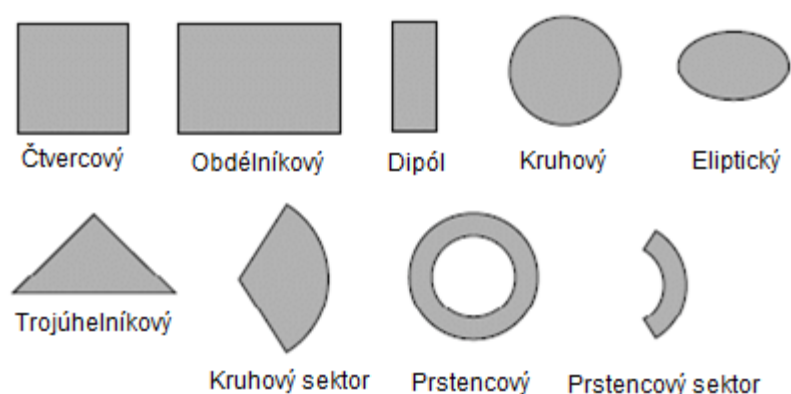
Celková délka zářiče l může být menší, pokud budeme drát (vedení) formovat do tvaru meandru. Meandrováním dosáhneme stejné rezonanční frekvence jako v případě standardního půlvlnného dipólu. Bez ohledu na svislé elementy je toto uzpůsobení charakterizováno výslednou mechanickou délkou vodivého pásku s , která je pak menší než celková délka l . Svislá i vodorovná složka se dohromady značí jako s_{tot} a platí, že $s_{tot} > l$. S drátovými meandrovými dipóly se ovšem často nesetkáváme. Využívají se zřídka, zejména jako RFID štítky například v čistírnách prádla, kde je kladen důraz na výdrž těchto štítků.

Častěji se setkáme s tištěným formátem meandrové antény. Metoda leptání tištěných spojů v oblasti výroby mikropáskových antén celkově patří mezi nejrozšířenější. Měď je v dnešní době nejpoužívanějším materiálem pro výrobu anténních vodičů a leptaných vzorů. Klíčovým faktorem pro velkovýrobu tagů je samozřejmě jejich cena. Existuje řada dalších i ekonomičtějších způsobů, jak finální tag vyrobit. Jako úspornější řešení se jeví využití vodivého inkoustu. Naopak dražší je proces, jenž zahrnuje výrobu na bázi elektricky vodivých nanočástic stříbra, případně uhlíku, pro vytvoření vodivé vrstvy. Zde je důležité, aby vyrobené antény dosahovaly velice nízké hmotnosti a při jejich umístění byl využit co nejmenší prostor. V případě vyšších kmitočtů, jako jsou ultra krátké a mikro vlny, má použitý konstrukční materiál rozhodující vliv na výsledné parametry antény, zejména pak na její impedanční přizpůsobení. K rezonanci dochází zpravidla na nižším kmitočtu než v případě použití půlvlnného dipólu. [31] [32] [33]

Obrázek 2.7: Princip meandrování a jednotlivé délky l a s

- **Tvary zářiče**

Jak je vidět na obrázku č. 2.8, mikropáskové antény mohou nabývat mnoha tvarů. Nejčastější konfigurace jsou čtverec, obdélník, kruh, elipsa, trojúhelník atd. Jedná se o kovové útvary, které jsou vytvořeny z jedné strany dielektrického substrátu. Relativní permitivita materiálu použitého pro substrát by měla splňovat rozsah $2,2 \leq \varepsilon_r \leq 12$. V případě RFID a WLAN (Wireless Local Area Network) komunikace má velké zastoupení anténa složená z formovaných řad dipólových mikropásků ve tvaru meandru, za účelem snížení anténní velikosti. Nazýváme ji meandrová anténa. [27] [29]



Obrázek 2.8: Ukázka vybraných tvarů zářičů mikropáskových antén

2.3 Meandrová anténa

V anglické literatuře se též řídce setkáme s typem nazývaným Rampartova anténa. Jak již bylo řečeno, anténní návrh se skládá z jednotlivých mikropáskových elementů zářiče, uzpůsobených do meandrovitého tvaru. Jedním z hlavních důvodů jejich výskytu v oblasti RFID jsou malé rozměry a jednoduchost výroby. Zisk a vyzařovací účinnost nejsou velké, ale jsou dostačující.

Anténa může mít dva formáty. Častější koncepce je meandrový pásek o velikosti $(\lambda/4)$, který je umístěn na substrátu s vodivou zemnicí plochou (tzv. ground plane format). Druhým případem je klasický půlvlnný dipól $(\lambda/2)$, který ovšem z důvodů svých nedostatků nesplňuje požadavky pro kmitočtové pásmo UKV. Návrh by byl příliš rozměrný a při rezonanci je reaktance antény příliš nízká a odpor příliš vysoký na to, aby odpovídal typicky nízké hodnotě ekvivalentního sériového odporu a vysoké kapacitanci pro UKV RFID. Meandrováním se tedy mění kapacita i indukčnost antény, které významně ovlivňují vstupní impedanci antény. Pokud zvětšíme výšku zářiče h a zachováme konstantní délku l , dojde ke zvýšení vzájemné kapacity mezi jednotlivými meandrovými sekcemi. Tyto sekce se potom chovají jako kondenzátory v sérii a zvýšení počtu meandrových sekcí N má tak za následek snížení celkové kapacity antény, ovšem indukčnost se nemění. V případě, kdy by výška h byla konstantní, vyžaduje přidání meandrových sekcí změnu délky l . Tím se nejenom sníží celková kapacita, ale také se zvýší celková indukčnost, přičemž se zvýšení indukčnosti projeví více. V obou případech klesá rezonanční frekvence s počtem meandrových sekcí N .

Tyto antény se v praxi používají často složené z více větví pro využití ve více kmitočtových pásmech. Tyto větve lze pro snadnou integraci do pouzdra přístroje prostorově skládat, například do tvaru kvádra. Dochází však k vzájemnému ovlivňování a návrh je pak dosti obtížný. [31] [32] [33] [35]

Jelikož se anténa druhově řadí k mikropáskovým, jejich způsob napájení se neliší. Shrnutí se nachází v podkapitole 2.2. Podrobněji se jím zabývá kapitola s reálným anténním návrhem.

2.3.1 Substrát

V tomto případě je do anténního návrhu zahrnut i její podklad. Musíme vždy pečlivě zvážit, pro jaký účel bude anténa navrhována a kde bude umístěna. To znamená, že při volbě dielektrika klademe důraz na jeho mechanické a elektrické vlastnosti. Na jejich základě je nutné docílit kompromisu tak, aby byl vliv substrátu na navrženou anténu co nejpříznivější.

Základní charakteristické vlastnosti substrátu jsou jeho relativní permitivita ϵ_r , tloušťka h a ztrátový činitel $tg \delta$. Mechanických požadavků je celá řada, zahrnujeme zde zejména odolnost vůči kritickým teplotám, vlhkosti a stárnutí materiálu. Dále pak bereme v úvahu přizpůsobivost, spájkovatelnost, hmotnost, pružnost a v neposlední řadě také cenu.

Jednou z klíčových vlastností je tloušťka dielektrika h . Ta svou velikostí ovlivňuje účinnost a šířku kmitočtového pásma antény. Čím nižší tloušťka, tím horší jsou tyto výsledné parametry. Ovšem zvýšením tloušťky také nedocílíme perfektních výsledků, protože navýšíme ztrátovost v dielektriku a ztráty vlivem tzv. povrchových vln. Nehledě na to, že navýšíme hmotnost celkové konfigurace.

Se zmiňovanými klíčovými parametry souvisí i další vlastnost substrátu, tou je jeho relativní permitivita. Nízká relativní permitivita zvyšuje účinnost antény a šířku pásma, naopak vysoká tyto parametry snižuje. Při analýze nehomogenních struktur zavádíme další parametr substrátu, a tím je efektivní permitivita. Vzhledem k tomu, že nesymetrické mikropáskové vedení obsahuje v příčném průřezu dvě různá prostředí s různou hodnotou permitivity, bývá analýza těchto struktur velice komplikovaná. Proto se nehomogenní dielektrikum nahrazuje takovým homogenním dielektrikem, aby se vlastnosti struktury zachovaly. Z relativní permitivity materiálu ϵ_r a vzduchu s hodnotou ϵ_0 vypočteme tzv. homogenní permitivitu, jež je dále označována efektivní permitivitou. Elektromagnetická vlna tedy existuje ve dvou prostředích, ve vzduchu nad páskem a v substrátu mezi páskem a zemnicí plochou. Existují dvě varianty výpočtu efektivní permitivity, jež jsou závislé na tloušťce H , relativní permitivitě materiálu ϵ_r a vypočtené šířce mikropáskové antény W viz vzorec č. 2.10 a 2.11. [18] [29]

Pokud je poměr $\frac{W}{H} < 1$, platí vztah:

$$\epsilon_{r,ef} = \frac{\epsilon_{r+1}}{2} + \frac{\epsilon_{r-1}}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1+12\frac{H}{W}}} + 0.04 \left(1 - \left(\frac{W}{H} \right)^2 \right) \right] \quad (2.10)$$

Pokud je poměr $\frac{W}{H} > 1$, platí vztah:

$$\varepsilon_{r,ef} = \frac{\varepsilon_{r+1}}{2} + \left[\frac{\varepsilon_r - 1}{2\sqrt{1 + 12\frac{H}{W}}} \right] \quad (2.11)$$

Přičemž platí, že $1 \leq \varepsilon_{r,ef} \leq \varepsilon_r$.

Pro hodnocení dielektrických ztrát se používá tzv. ztrátový činitel (rozptylový faktor) $\tan \delta$, což je podíl proudu činného k proudu kapacitnímu (jalovému). Je-li dielektrikum dokonalé, protéká kondenzátorem VF proud, který o 90° předbíhá VF napětí. Pokud se tento úhel zmenšuje, dochází ke ztrátám v dielektriku. Úhlový rozdíl od původních 90° se poté značí δ a nazývá se úhlem dielektrických ztrát. Dílčí typy substrátu pro výrobu meandrové antény pro kmitočet 2,45 GHz jsou rozebrány v kapitole 3. [18] [29]

2.3.2 Impedanční přizpůsobení a symetrizace

Aby při měření s vektorovým analyzátozem nedocházelo ke zkreslení výsledných hodnot, musí být impedance na vstupu antény $50 + j0 \Omega$. V opačném případě by docházelo k odrazu vlny na vedení vlivem nepřizpůsobení. Jelikož je koaxiální kabel asymetrický, není nutno žádných přizpůsobovacích a transformačních členů, protože anténa, vedení a zátěž pracují na shodné impedanci 50Ω . Pokud je tento požadavek splněn, nedochází ke vzniku stojatého vlnění. Přizpůsobení meandrové antény na požadovaný kmitočet bylo provedeno za pomoci úseku mikropáskového vedení.

- **Transformační člen o délce $\lambda/4$ a opakovač impedance $\lambda/2$:**

Jedním ze způsobů impedančního přizpůsobení na kmitočtech do řádově stovek MHz je konstrukce transformačního členu o délce $\lambda/4$ v kombinaci s vedením o velikosti $\lambda/2$ (opakovačem impedance). Přizpůsobovací obvod je považován za dvojbran, zařazený mezi zátěž a přenosové vedení, který transformuje impedanci zátěže na hodnotu shodnou s charakteristickou impedancí přenosového vedení. Principiálně je tato metoda velmi jednoduchá, můžeme využít koaxiální kabel s pevným dielektrikem. Metoda je nevhodná pro širokopásmové aplikace, využíváme ji zejména k přizpůsobení na jeden jediný požadovaný kmitočet. Při zjišťování jeho mechanické délky musíme zohlednit rozdílnou rychlost šíření elektromagnetického vlnění ve vakuu a v dielektriku koaxiálního kabelu. Tu nám stanovuje parametr činitele zkrácení k , který se ve většině případů pohybuje v rozmezí hodnot 0,6 až 0,85. Přičemž musí platit poměr:

$$k = \frac{l_{mech}}{l_{el}} = \frac{\lambda_{mech}}{\lambda_{el}} \leq 1 \quad (2.12)$$

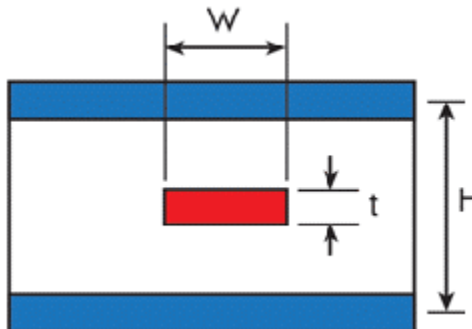
Tuto hodnotu lze vyčíst z katalogových údajů výrobce kabeláže. Pokud tato informace není k dispozici, vycházíme z těchto odhadů – pro kabely s plným dielektrikem z polyethylenu 0,65 až 0,66 a pro pěnová dielektrika 0,8 až 0,81.

Pro přizpůsobení a symetrizaci na vyšších kmitočtech (řádově jednotky GHz) vznikly jako náhrada za koaxiální vedení tzv. planární baluny. Zkratka vychází z angl. slov balance-unbalance.

Mikropáskové vlnovody se využívají v nízko výkonových přenosových systémech. Jak již bylo v práci zmíněno, skládají se z dielektrického substrátu tloušťky h o relativní permitivitě ϵ_r , na které jsou litograficky vytvořeny obrazce z vodivého materiálu. Dělí se na několik základních typů. Z pohledu symetrizace jsou zde uvedeny dva základní typy; asymetrické (microstrip) a symetrické (stripline). Na navrhovanou meandrovou anténu lze pohlížet jako na asymetrické mikropáskové vedení.

- **Symetrické mikropáskové vedení (stripline)**

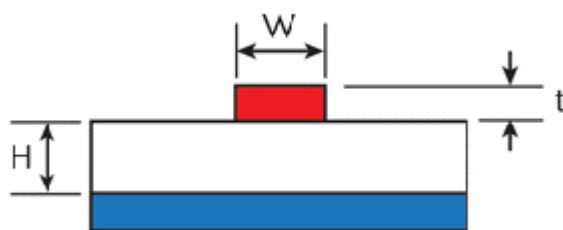
Na rozdíl od otevřeného nesymetrického mikropáskového vedení se zde nachází zemnicí plocha na obou stranách substrátu. Dalším rozdílem oproti nesymetrické variantě je umístění vodivého pásku, který se nachází uvnitř substrátu. Důsledkem šíření v homogenním prostředí, které je charakteristické svým ϵ_r , zde vzniká jen vlna TEM.



Obrázek 2.9: *Struktura symetrického mikropáskového vedení (stripline)*

- **Nesymetrické mikropáskové vedení – otevřené (microstrip)**

Jedná se o základní typ planárního vedení. Skládá se z dielektrického nebo polovodičového substrátu s tím rozdílem, že je zde na jedné straně vodivý pásek a na druhé zemnicí plocha. Příčná nehomogenost vedení znemožňuje šíření TEM vlny, ani čisté TM a TE vlny. Šíří se po něm vlna podobná TEM, ale s rostoucí frekvencí přibývají složky E a H i ve směru šíření, jedná se o tzv. kvazi TEM vlnu. Obrovskou výhodou při praktickém řešení symetrizace připojení meandrové antény je asymetričnost vstupu antény, kde v podstatě stačí přivést asymetrické souosé koaxiální vedení o charakteristické impedanci 50Ω .



Obrázek 2.10: *Struktura nesymetrického mikropáskového vedení (microstrip)* [30]

3 Návrh, modelování a simulace meandrové antény

Tato kapitola se zabývá anténním návrhem a softwarovou simulací prostřednictvím programu CST MICROWAVE STUDIO (dále pouze CST) pro rezonanční kmitočet 2,45 GHz meandrové antény.

3.1 O programu CST Microwave Studio

Jedná se o komerční simulační software, který nabízí efektivní výpočetní řešení a analýzu elektromagnetických vysokofrekvenčních a mikrovlnných komponentů. Je součástí komplexního programového balíku CST Studio Suite. Umožňuje vytvářet 3D modely antén, filtrů, planárních a vícevrstvých struktur jak v časové, tak frekvenční oblasti. Simulační software obsahuje několik simulačních algoritmů založených na časové, frekvenční nebo integrované doméně.

Výsledný model je posléze diskretizován v podobě tzv. mesh mřížky. Jedná se tedy o síť s určitou hustotou a tvarem buněk (lze je specifikovat), na jejímž základě se v určitých uzlech řeší numerické výpočty dle Maxwellových rovnic.

Po namodelování určité struktury a nastavení všech potřebných parametrů je pro dané řešení nutné zvolení vhodného solveru. Program CST nabízí celkem šest solverů, mezi nejvyužívanější patří:

- **Transient solver** – jedná se o velmi využívanou analýzu v časové oblasti, která je vhodná pro výpočet vysokofrekvenčních aplikací jako jsou antény, VF filtry a přenosové cesty. Pro výpočet využívá tzv. metody FIT (Finite Integration Technique), jež se podobá metodě konečných diferencí, avšak namísto Maxwellových rovnic v diferenciálním tvaru používá jejich integrální tvar.

- **Frequency domain solver** – tzv. frekvenční analýza. Využívá se zejména pro velmi přesný výpočet na nižším frekvenčním rozptylu (úzkopásmové úlohy). Pro výpočet využívá tzv. metody FEM (Finite element method).

- **Eigenmode solver** – zahrnuje zejména simulace uzavřených rezonančních struktur (filtry), sdružovačů a dutin. Typicky se využívá k vytváření disperzních diagramů.

- **Integral equation solver** – metoda výpočtu dle integrálních rovnic.

Z vypočteného rozložení elektromagnetického pole dokáže CST vyčíslit parametry, jako jsou zisk antény, rozptylové parametry, směrové charakteristiky a další. Pro svou složitost CST vyžaduje značnou teoretickou a praktickou znalost řešeného problému i samotného simulačního nástroje. Umožňuje importovat a exportovat již vytvořené modely například z programu AutoCAD ve formátech SAT, IGES, STEP, STL, DXF atd.

3.2 Návrh meandrové antény

- **Výpočet a odvození rozměrů**

Prvním základním bodem při navrhování antén je výpočet vlnové délky, ten je nutný znát k odvození délky anténních prvků. Následující vzorec č. 3.1 popisuje vztah mezi kmitočtem, udávaným v jednotkách Hz, a délkou elektromagnetické vlny λ [m]; kde c je rychlost světla (přibližně 3×10^8 [m/s]). Vlnová délka ve vzduchu je nepřímo úměrná kmitočtu.

$$\lambda = \frac{c}{f} \text{ [m]} \quad (3.1)$$

$$\lambda = \frac{299\,792\,458}{2,45 \times 10^9} = \mathbf{122,36 \text{ mm}}$$

Z teorie meandrových (mikropáskových) antén již z předchozího textu víme, že jedním z možných variant jejich stavby je umístění na dielektrický substrát. Musíme tedy vzít v úvahu fakt, že dojde ke zkrácení délky vlny obdobně jako je tomu v případě činitele zkrácení u koaxiálního vedení. Tímto zkrácením stanovíme její pracovní vlnovou délku. Šířka anténního prvku W byla stanovena pro rozměr 1,4 mm a výška substrátu H je 1,524 mm. Výsledný poměr $\frac{W}{H}$ je tedy < 1 . Efektivní permitivitu vypočteme následujícím vztahem (2.10):

$$\epsilon_{r,ef} = \frac{3}{2} + \frac{3}{2} \left[\frac{1}{\sqrt{1 + 12 \frac{1,524 \times 10^{-3}}{1,4 \times 10^{-3}}}} + 0,04 \left(1 - \left(\frac{1,524 \times 10^{-3}}{1,4 \times 10^{-3}} \right)^2 \right) \right] = \mathbf{2,267}$$

Pak pro pracovní (mechanickou) vlnovou délku λ_p platí:

$$\lambda_p = \frac{\lambda}{\sqrt{\epsilon_{r,ef}}} \text{ [m]} \quad (3.2)$$

Po dosazení:

$$\lambda_p = \frac{122,36}{\sqrt{2,267}} = \mathbf{81,267 \text{ mm}}$$

Zkracovací součinitel je tedy dán vztahem:

$$k = \frac{81,267}{122,36} = \mathbf{0,664}$$

Kde λ_{mech} odpovídá délce konkrétního vedení a λ_{el} odpovídá danému kmitočtu.

- **Volba substrátu**

Z důvodů nízkých pořizovacích nákladů a dostupnosti byl jako materiál prvně uvažován vícevrstvý FR4 (skelný laminát plátovaný měděnou fólií) s relativní permitivitou pohybující se v rozsahu $\epsilon_r = 4,3 - 4,8$ a rozptylovým faktorem $\tan \delta = 0,025$. Ten ovšem díky své velké ztrátovosti pro vyšší kmitočty nad 1 GHz dostatečně nesplňuje požadavky pro tento návrh.

Vysoký útlum pro zadaný kmitočet 2,45 GHz by způsobil razantní snížení účinnosti antény. Byl tedy zvolen vhodnější materiál z vysoce kvalitního laminátu, který slouží jako alternativa PTFE (Polytetrafluorethylen), jenž nabývá nižších útlumů na vyšších kmitočtech a je velmi teplotně odolný a stabilní v širokém rozsahu frekvencí. Navržená anténa se tedy nachází na substrátu ASTRA MT77 o výšce $h = 1,524$ mm s nižší relativní permitivitou $\varepsilon_r = 3$ a rozptylovým faktorem $\tan \delta = 0,0017$.

- **Napájení meandrové antény**

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, nejoblíbenější čtyři varianty napájení mikropáskových antén jsou mikropáskovým vedením, koaxiální sondou, kapacitní vazbou a pomocí zkratované šterbiny. Z hlediska využitelnosti a potřeby ověření antény měřením byl pro připojení napáječe k anténě zvolen způsob s koaxiálním VF SMA konektorem. Jedná se o samici se 4 nožičkami a středním vodičem. Celková koncepce je realizována tak, že dvě vrchní nožičky jsou připájeny z horní strany přímo k substrátu a spodní dvě zdola k zemnicí ploše. Střední vodič je připájen přímo k vodivému anténnímu mikropáskovému vedení (meandru). Dílčí rozměry jsou odvozeny z informací obsažených v katalogu prodejce. Materiál, ze kterého je konektor vyhotoven, je především mosaz (místy pozlacený), střední vodič je z beryliové mědi a dielektrikum je z PTFE (nazýváme také teflon). Charakteristická impedance konektoru je 50Ω a jeho hraniční kmitočet použitelnosti je do 12,4 GHz.

3.3 Modelování meandrové antény v programu CST

Existuje celá řada simulačních prostředí sloužících k navrhování, modelování a optimalizování antén a anténních systémů. Pro konkrétní anténní návrh na kmitočtu 2,45 GHz byl zvolen program CST.

Celkem byly vytvořeny 3 alternativy lišící se finálním tvarem, rozměry prvků a způsobem provedení simulace meandrové antény. První navrhovaný model č. 1 dosahuje nejlepších výsledků, a proto je zde rozebrán důkladněji než zbývající dva. Důvod vytvoření alternativních modelů je rozebrán v kapitole č. 4, která se zabývá problematikou fyzické výroby antény.

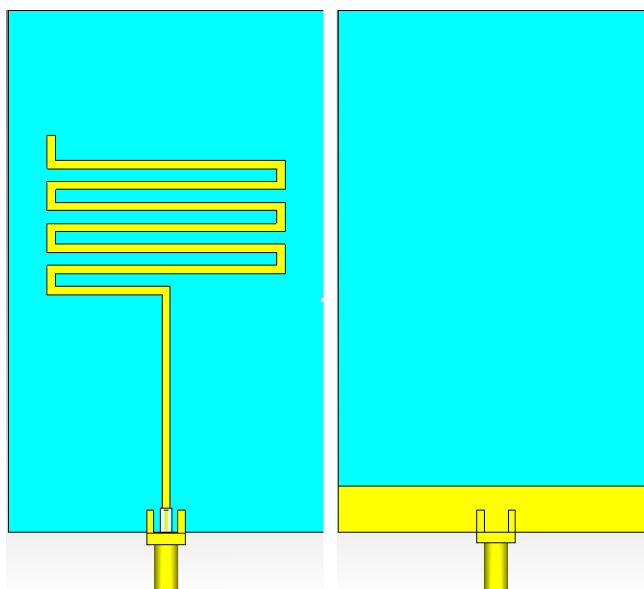
- **Návrh modelu č. 1**

Po vypočtení rozměrů následovalo založení modelu v programu CST. Prvním namodelovaným komponentem byl substrát. Knihovna s předem vytvořenými materiály a jejich vlastnostmi neobsahovala komponent ASTRA MT77. Bylo tedy nutné jeho ruční vytvoření a posléze zařazení do knihovny. Byly stanoveny pouze klíčové parametry materiálu jako jsou relativní permitivita a rozptylový faktor. Tloušťka desky vycházela z rozměrů stanovených výrobcem plošných spojů na 1,5 mm.

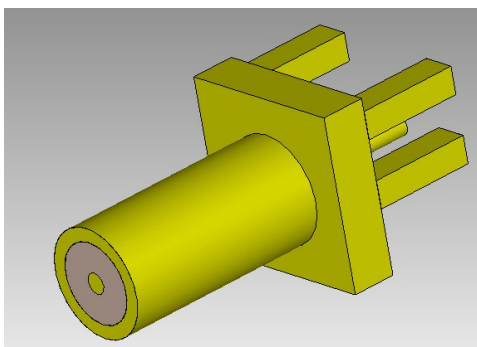
Na horní straně substrátu se nachází meandrový pásek tvořený z mědi o tloušťce 0,035 mm. Délky těchto jednotlivě naskládaných prvků jsou odvozeny z vypočtené pracovní vlnové délky na zadaném kmitočtu. Prvotní návrh dle výpočtem stanovených rozměrů byl velice nepřesný. Jelikož v dostupné literatuře neexistuje žádný přesný vzorec, který by popisoval pravidla pro výpočet délky a tvar meandru, byla celková délka volena intuitivní cestou s ohledem

na pracovní vlnovou délku. Zemní ploška je tvořena také mědí s tloušťkou jako meandrový pásek 0,035 mm.

V poslední řadě byl dle katalogových hodnot namodelován konektor, který je připojen středním vodičem k vodivému mikropásku, horní dvě nožičky jsou umístěny na substrátu a spodní dvě k zemní destičce. Rozměry tloušťky mědi, substrátu a celková velikost navrženého konektoru jsou navrženy staticky a v žádném z těchto tří případů nedochází ke změnám velikostí. Pro přehlednost byly sestaveny tabulky č. 3.1 a 3.2, a také okótovaný technický náčrt modelu na obr. 3.3 obsahující detailní informace o rozměrech jednotlivých prvků meandrové antény. Přední a zadní náhledy vytvořených motivů v simulačním prostředí CST se nachází na obrázcích 3.1, 3.4 a 3.5. Namodelovaný konektor je vyobrazen na obr. 3.2.



Obrázek 3.1: Přední a zadní náhled modelu č. 1 meandrové antény, výstup z CST



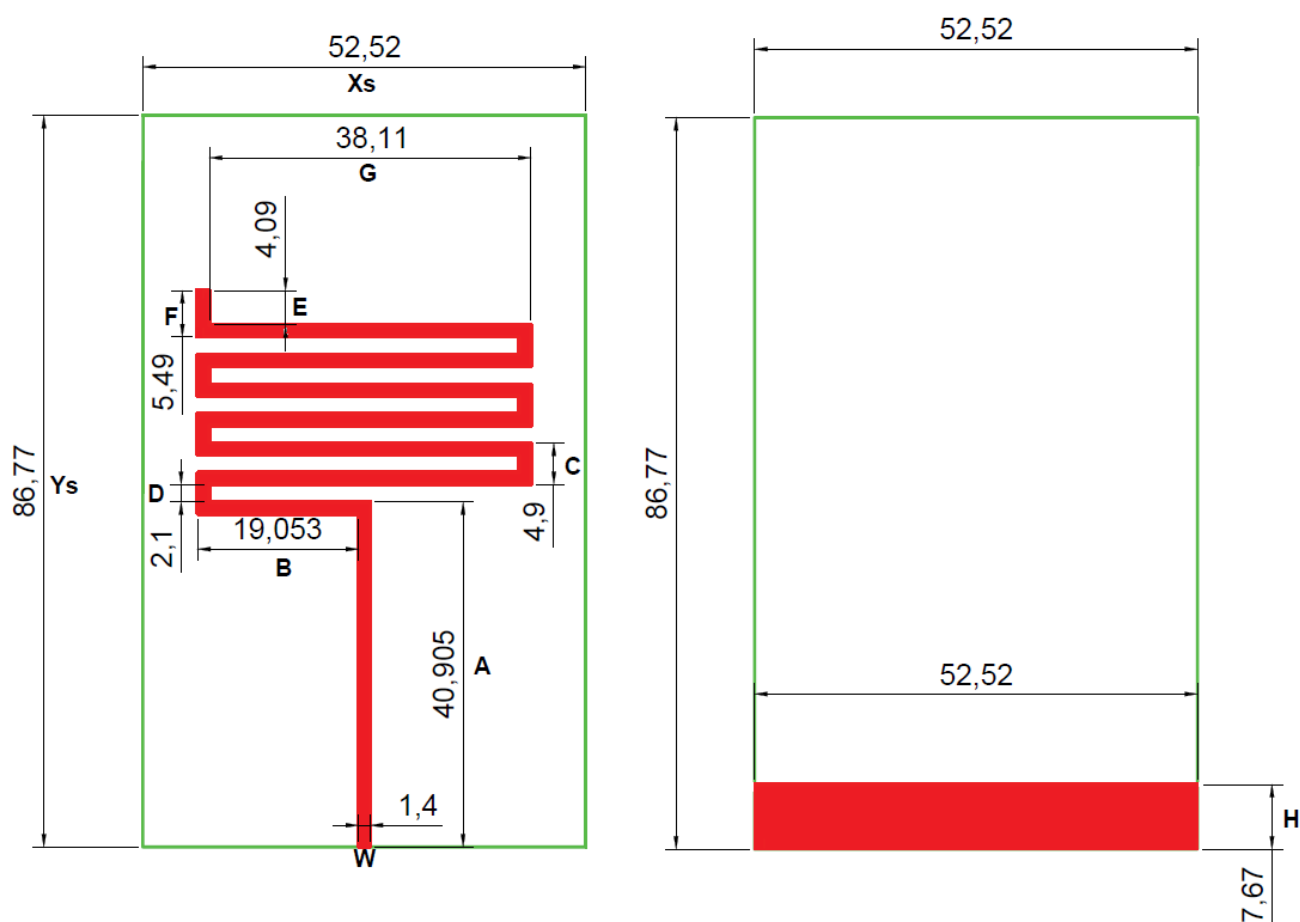
Obrázek 3.2: Detail modelovaného SMA konektoru typu Female Edge, výstup z CST

Tabulka 3.1: Rozměry Meandrové antény pro model č. 1 – přední náhled

Prvek	A	B	C	D	E	F	G	W
Délka vyjádřená [λ_g]	0,503	0,234	0,06	0,026	0,05	0,068	0,469	0,017
Délka prvku [mm]	40,905	19,053	4,9	2,1	4,09	5,49	38,11	1,4

Tabulka 3.2: Rozměry Meandrové antény pro model č. 1 – zadní náhled

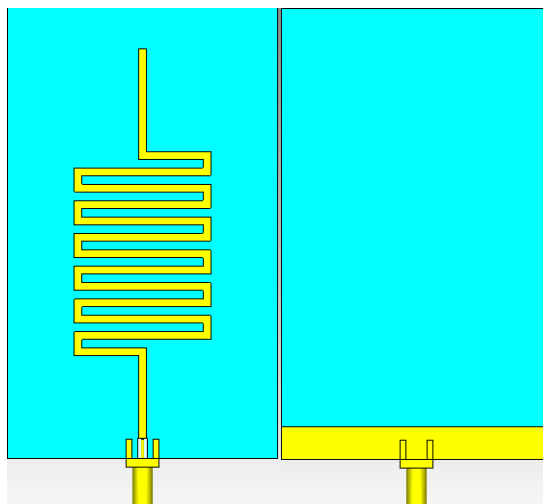
Prvek	H	Xs	Ys
Délka vyjádřená [λ_g]	0,094	0,646	1,068
Délka prvku [mm]	7,67	52,52	86,77



Obrázek 3.3: Technický náčrt modelu č. 1 meandrové antény s rozměry – 2D

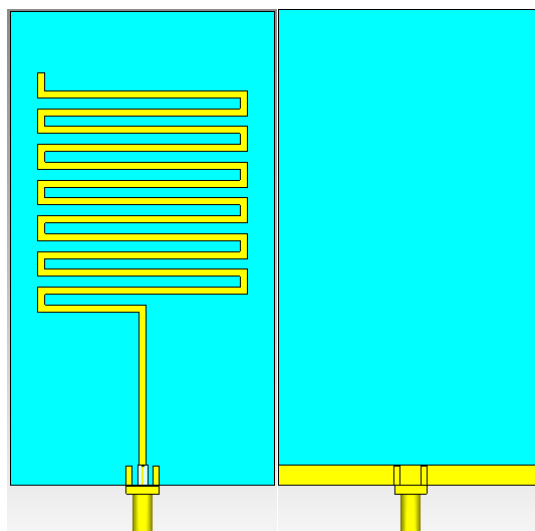
Základní stavební koncepce těchto modelů zůstává neměnná. Avšak dochází k drobným alternativním úpravám tvaru meandru a ke změnám velikostí výšky zemnicí plochy a šířky meandrových pásků. Model č. 1 se díky svým výsledkům jeví jako nejvhodnější, byl proto vybrán pro detailnější rozbor. Detailnější rozbor alternativních modelů č. 2 a 3 prokázal, že výsledky nepředěšly první navrhovaný model. Jednotlivé výstupy z CST všech modelů jsou zobrazeny prostřednictvím grafů v podkapitole 3.4.

- **Návrh modelu č. 2**



Obrázek 3.4: Přední a zadní náhled modelu č. 2 meandrové antény, výstup z CST

- **Návrh modelu č. 3**



Obrázek 3.5: Přední a zadní náhled modelu č. 3 meandrové antény, výstup z CST

3.4 Simulace

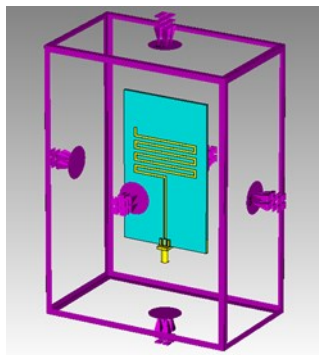
Po dokončení návrhu modelu spustíme simulaci. Podstatnou část simulace tvoří její nastavení. Pro správnou funkci je nutné nastavit hned několik klíčových parametrů. V první řadě nastavujeme frekvenční rozsah, pro který chceme sledovat funkčnost našeho navrženého modelu. Dle mého názoru je nejlepší postupovat takovým způsobem, že si nejprve nastavíme menší citlivost a zvolíme velký frekvenční rozsah. Samozřejmě s čím větší přesností simulace pracuje, tím se zvětšuje čas pro její provedení. Je nutné docílit rozumného kompromisu tak, abychom nesimulovali příliš dlouho, ale zároveň aby byla přesnost simulace relativně velká.

Po dokončení simulace sledujeme výsledky, které se nachází v záložce 1D Results – S_{11} a VSWR (PSV), a dále pak zisk antény a její směrovou charakteristiku. Výsledky 1D reprezentují vstupní činitel odrazu a poměr stojatých vln, jež velmi úzce souvisí s impedančním přizpůsobením navrhované antény. Pro planární antény je akceptovatelný výsledek S_{11} menší než -10 dB. Čím více klesá tato hodnota od nuly, tím lépe je anténa přizpůsobena. Tímto způsobem se dovíme orientační hodnoty kmitočtů, na kterých dochází k rezonanci. Po provedení úprav, které vedou ke zlepšení žádoucích parametrů postupujeme snížením kmitočtového rozsahu a navýšením přesnosti simulace.

Pro simulaci meandrové antény byl zvolen rozsah kmitočtu od 2 do 3 GHz, aby bylo možné analyzovat šířku použitelného kmitočtového pásma. Cílem bylo navrhnout anténu na požadovaný kmitočet 2,45 GHz. Pro výpočet simulace modelu č. 1 byl využit frekvenční solver (řešič), který se více hodí pro úzkopásmové/rezonanční úlohy. Pro další dva modely byl využit časový řešič.

Okrajové podmínky simulace jsou umístěny na střed tak, aby byla dodržena symetrie pro zvolenou frekvenci 2,45 GHz v záložce Simulation: Settings – Boundaries. Správné nastavení by mělo vypadat jako na obrázku č. 3.6. Nastavení monitorů elektrického a magnetického pole rovněž volíme pro zadaný kmitočet.

Při navrhování modelu byl kladen velký důraz na přesnost a na co největší přiblížení reálné, později konstruované antény. Byl zde použit konektor dle rozměrů přesně stanovených výrobcem. Také se zde nachází ploška z cínu v místě připojení SMA konektoru na vstupu antény.

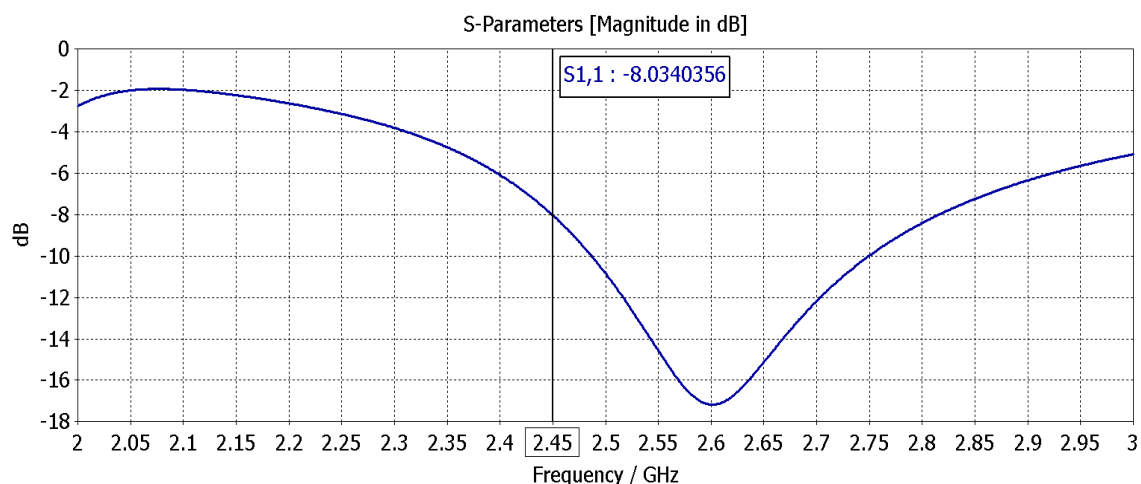


Obrázek 3.6: Ukázka nastavení ohraničení okolí simulace

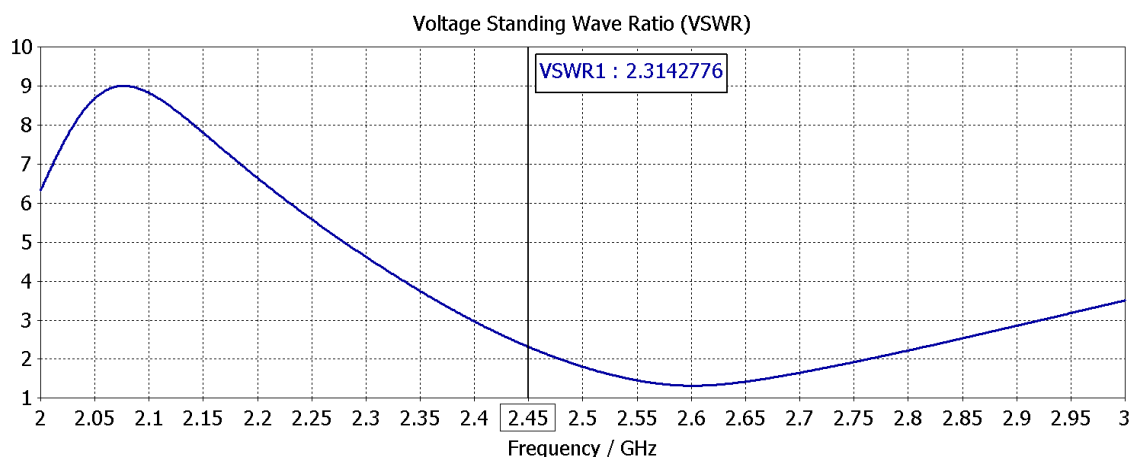
3.5 Výsledky simulací

• Model 1 před optimalizací

Výsledky prvotního modelu před optimalizací, jsou vyobrazeny s relativně velkou přesností prostřednictvím obr. 3.7 a 3.8. Z těchto výsledků je zřejmé, že anténa není impedančně přizpůsobena na požadovaném kmitočtu a nejlepších výsledků vykazuje až v hodnotách okolo 2,6 GHz. Poměr stojatých vln větší než 2 : 1 jednoznačně nestačí pro návrh vysílací antény. Parametr S_{11} dosahuje na zadaném kmitočtu pouze hodnoty -8 dB, což je pro reálný návrh také nedostačující. V této situaci byl nutný zásah do anténních rozměrů, které byly nejprve provedeny funkcí **par. sweep**. Tato funkce slouží jako smyčka simulací, kde ručně zvolíme parametr a požadovaný krok, se kterým simulace mění zadaný rozměr zvoleného prvku.



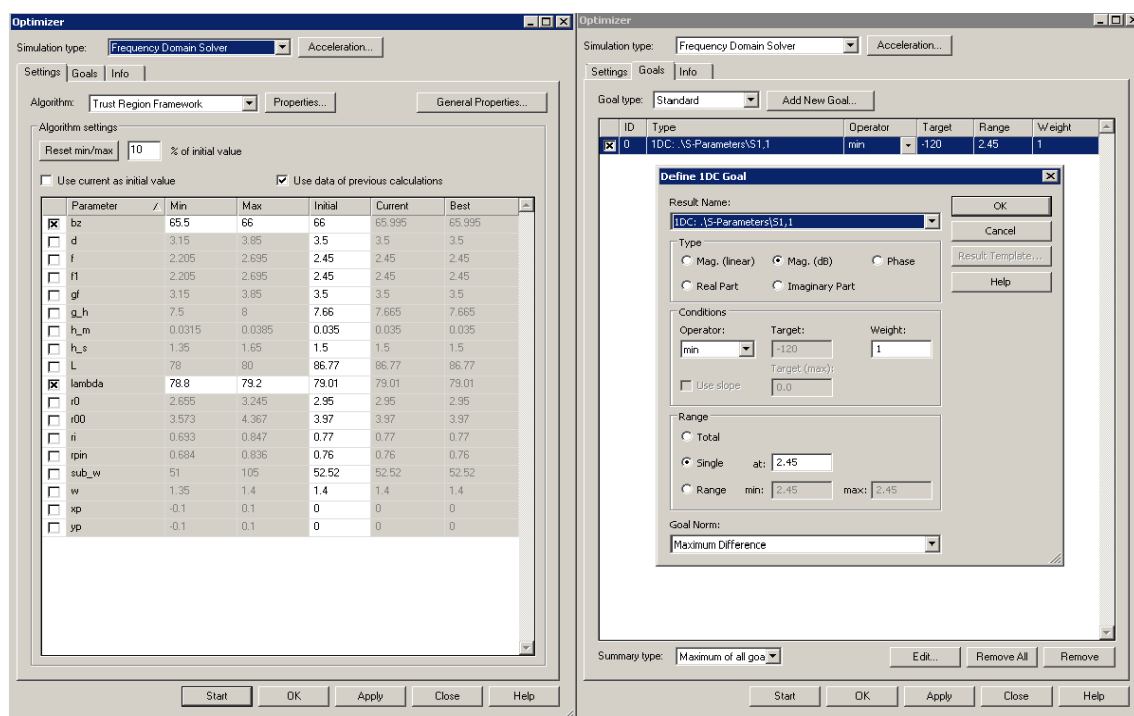
Obrázek 3.7: Parametr S_{11} prvotního návrhu meandrové antény



Obrázek 3.8: Parametr PSV prvotního návrhu meandrové antény

• Popis procesu optimalizace

Funkce **par. sweep** pomohla velmi efektivně objasnit, které z parametrů mají na posun rezonančního kmitočtu markantní vliv. Po ručním ladění s velmi vysokou přesností simulace bylo docíleno přibližných hodnot kmitočtů, jež se velmi blížily hodnotě 2,45 GHz. Dalším krokem byla automatická optimalizace pomocí funkce **optimizer**, která již hledá zadaný parametr automaticky, dle zvoleného algoritmu. Jedno z možných nastavení této funkce lze spatřit na obr. 3.9. Pro účely automatické optimalizace je vyžadováno patřičné parametrizování velikostí jednotlivých prvků antény tak, abychom mohli měnit pouze jejich velikost v požadované ose x, y, z.

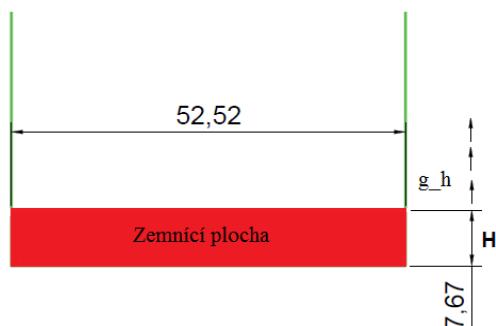


Obrázek 3.9: Náhled z prostředí CST – funkce **optimizer**

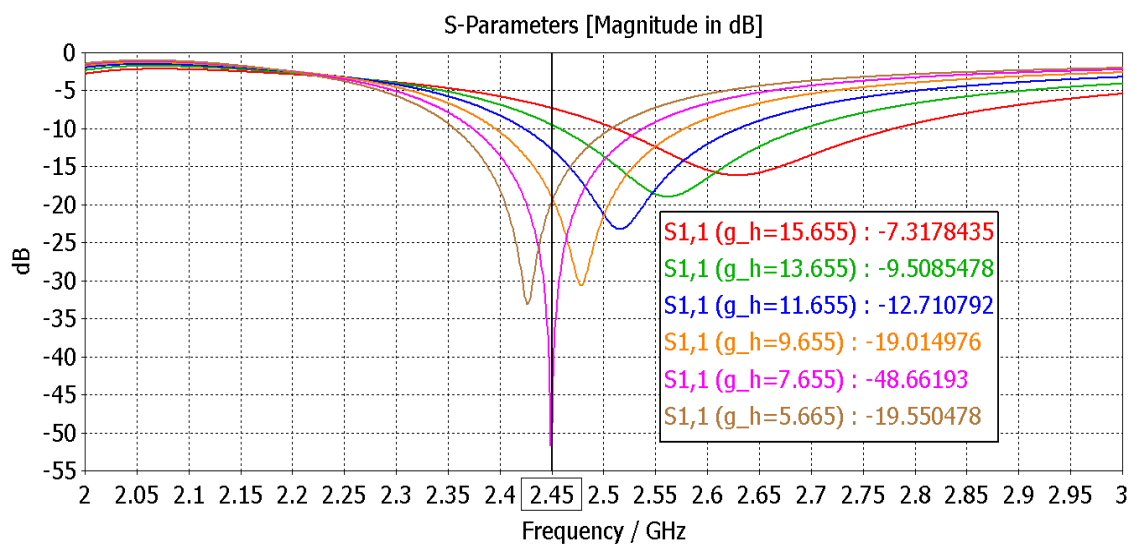
Z obrázku č. 3.9. lze vyčíst použitý algoritmus výpočtu, jenž je v tomto případě Trust Region Framework. Tento algoritmus je rychlý a přesný a vyznačuje se robustní konvergencí. Vyžadovaný cíl optimalizace pro takové nastavení je najít nejnižší možný výsledek parametru S_{11} v jednotkách dB na požadovaném kmitočtu 2,45 GHz. Dvě možné varianty nastavení změny velikostí parametrů jsou uskutečněny buď staticky (ručně) nebo procentuální změnou. Mezi parametry, které razantně ovlivňují rezonanční kmitočet této antény a impedanční přizpůsobení, patří g_h (výška zemnicí plochy), $lambda$ (šířka anténních elementů meandru) a velikost přizpůsobovacího pahýlku mikropásku s názvem bz , který byl vytvořen pro potřeby přesného přizpůsobení impedance na hodnotu 50 Ω .

Pro bližší pochopení funkce **optimizer** a **par. sweep** je zde přiložen náhled nastavení a zároveň grafy závislosti velikosti jednotlivých prvků na parametru S_{11} .

Jednotlivě měněné úseky jsou pro přehlednost vyjmuty z technického náčrtu modelu č. 1 a v případě parametru bz a λ jsou zvýrazněny modrou barvou. Ke změnám pak dochází ve směru vyznačeném šipkami.

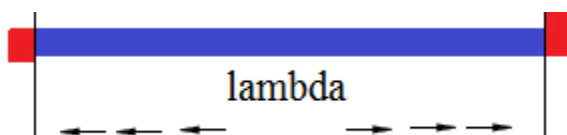


Obrázek 3.10: Změna velikosti zemnicí plochy, parametr „ g_h “

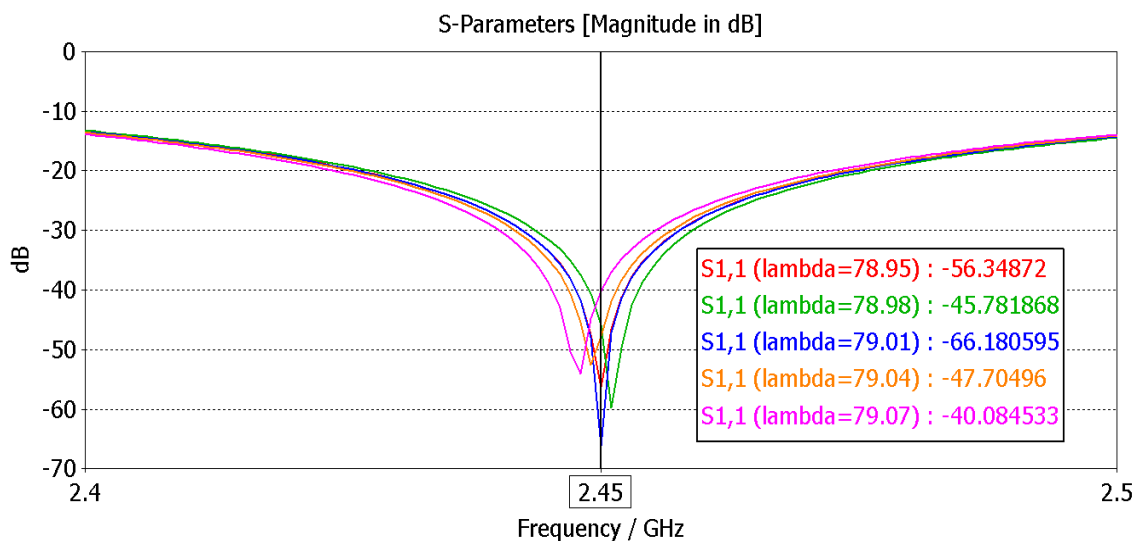


Obrázek 3.11: Závislost parametru S_{11} na změně výšky zemnicí plochy, parametr „ g_h “

Navyšováním parametru g_h měníme výšku zemnicí plochy ve směru šipek (v ose y) na obr. 3.10, která má obrovský vliv na impedanční přizpůsobení a rezonanční kmitočet antény. Z grafu parametru S_{11} na obr. 3.11 je patrné, že když dochází k zmenšování výšky tohoto prvku, dojde k posunu rezonančního kmitočtu na nižší hodnoty. V případě, že budeme parametr zvyšovat, kmitočet se navyšuje a způsobuje impedanční nepřizpůsobení. Ideální výška parametru g_h po optimalizaci vyšla 7,67 mm. Tento rozměr byl využit k výrobě reálného modelu antény.



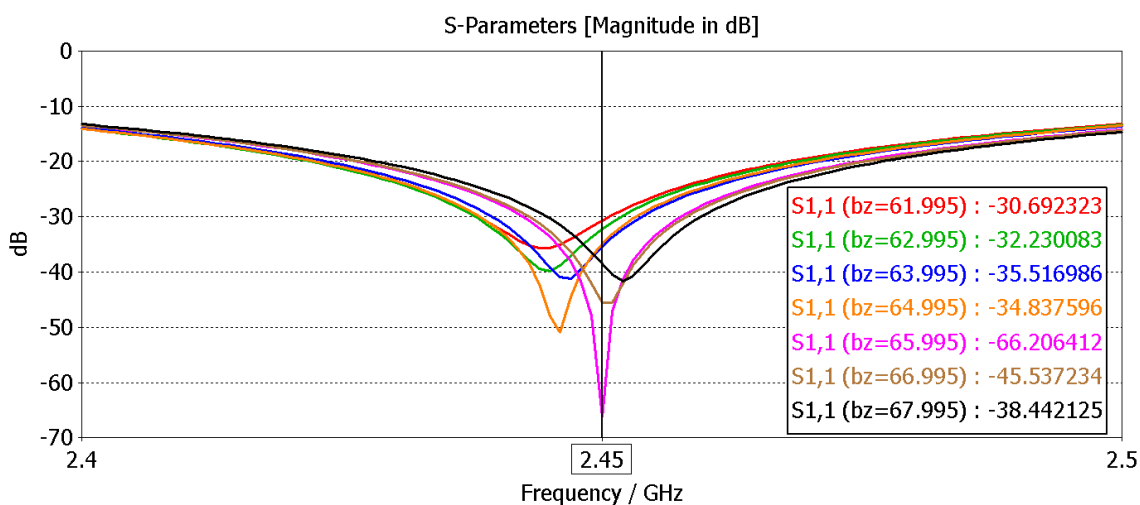
Obrázek 3.12: Změna velikosti šířky úseku mikropásky, parametr „ λ “



Obrázek 3.13: Závislost parametru S_{11} na změně šířky úseku mikropásku, parametr „ λ “



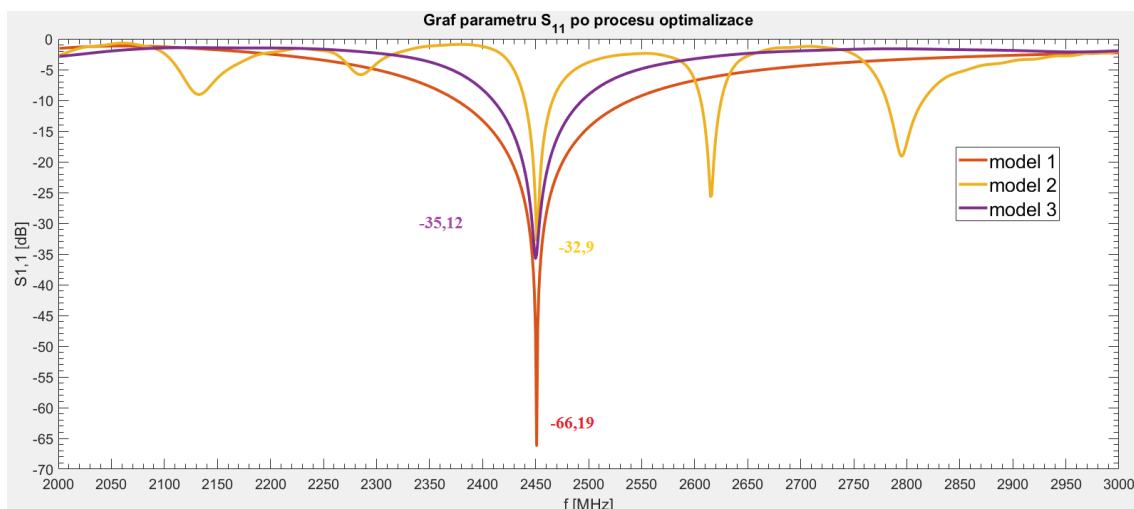
Obrázek 3.14: Změna velikosti výšky úseku mikropásků, parametr „ bz “



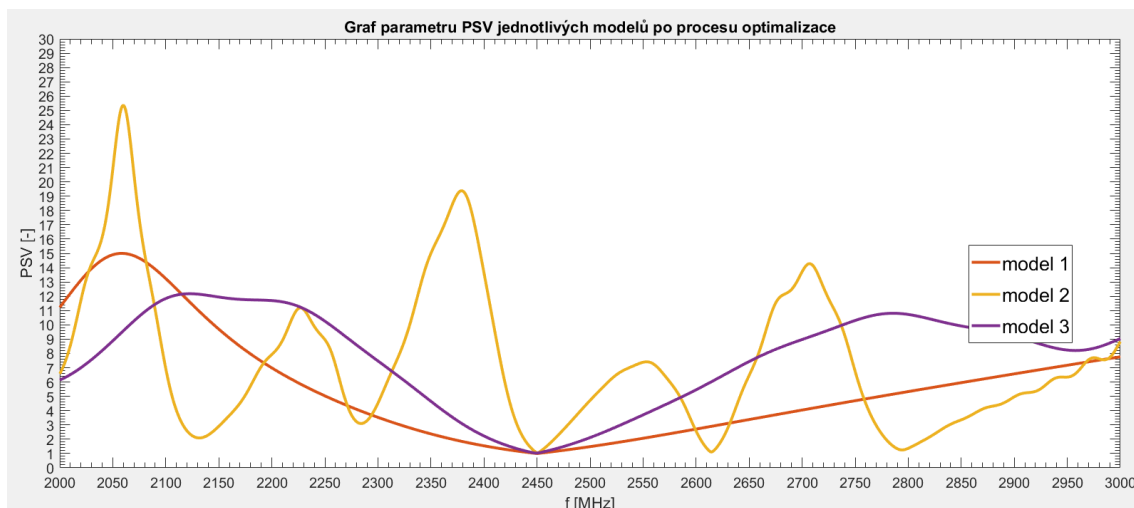
Obrázek 3.15: Závislost parametru S_{11} na změně výšky přizpůsobovacího úseku mikropásků, parametr „ bz “

Parametry λ a bz jsou nastavovány s velmi jemnými kroky na nižším frekvenčním rozsahu. Aby byl vliv zřetelný, jsou grafy na obr. 3.13 a 3.15 přiblíženy. Změnou šířky všech úseků označených λ , vyobrazených na obr. 3.12 (v ose x), byla anténa naladěna na požadovaný kmitočet 2,45 GHz. Změnou délky mikropáskového pahýlku bz bylo docíleno velmi precizního impedančního přizpůsobení antény na požadovanou hodnotu PSV 1 : 1.

Funkce **optimizer** pracuje s přesností až na 12 desetinných míst hodnoty volených parametrů. Z hlediska reálné realizace antény a s ohledem k přesnosti automatizované výroby je rozumné pracovat v řádech maximálně desetin až tisícín milimetru. Po optimalizaci proběhla korekce v podobě zaokrouhlení rozměrů prvků na tisíciny (mikrometry). Toto zaokrouhlení opět mírně ovlivnilo (posunulo) minima parametrů S_{11} a zhoršilo celkové PSV. Poté bylo nutné simulaci ještě s velmi jemnými kroky doladit ručně pomocí parametru λ a bz . Tímto způsobem bylo docíleno požadovaných výsledků jak PSV, tak S_{11} a zároveň rozměrů vhodných pro zvolenou metodu výroby fotocestou. Z důvodu velkého počtu výstupů z CST byly grafy PSV a S_{11} všech tří modelů transformovány v programu MATLAB, vždy do jednoho výstupu. Lze tak zřetelně pozorovat odlišnosti těchto uzpůsobení. Výsledky vycházející z optimalizací jsou vyobrazeny grafy na obr. 3.16 a 3.17.



Obrázek 3.16: Graf parametru S_{11} návrhu meandrové antény po optimalizacích



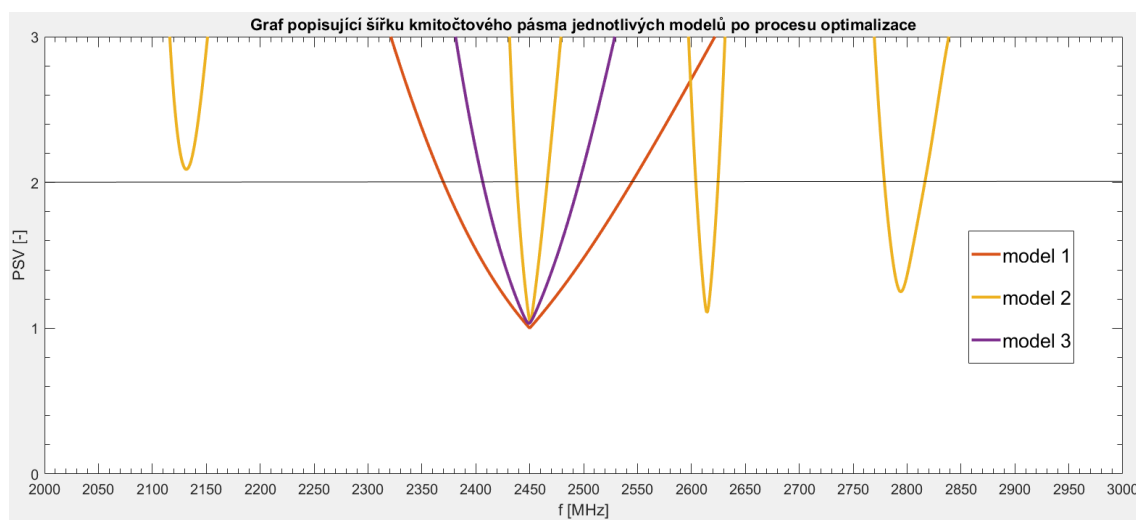
Obrázek 3.17: Graf parametru PSV návrhu meandrové antény po optimalizacích

- **Shrnutí dosažených výsledků všech tří modelů po optimalizaci**

Z těchto dvou grafů je zřejmé, že navrhované antény v CST jsou precizně přizpůsobeny na požadovaný kmitočet. Parametr S_{11} modelu č. 1 dosahuje minimální hodnoty -66,19 dB a PSV je 1 : 1. Dosažené výsledky všech tří modelů jsou pro přehlednost shrnuty tabulkou 3.3. Pro finální vyobrazení šířky využitelného pásma byl zvolen graf PSV na obr. 3.18. Ta je pro každou křivku vymezena dvěma hraničními body, jenž nepřesahují hodnotu PSV 2 : 1. Zvolená hodnota PSV cca odpovídá hodnotě S_{11} v bodě -10 dB. Tento limit uvažujeme v případě, že by anténa byla využita jako vysílací. Šířka pásma v případě modelu č. 1 by mohla nabývat hodnot 2,37– 2,545 GHz, což činí šířku o velikosti 175 MHz. Pro přijímací typ antény bychom mohli pracovat s poměrem až do hodnot PSV 3 : 1. Další dva navrhované modely jsou poněkud úzkopásmovější, dosahují využitelné šířky pásma 90 a 28 MHz. Model č. 2 dosahuje přijatelných hodnot PSV na více kmitočtech. Tato minima jsou pozorována z grafu na obr. 3.16 na frekvencích 2,45, 2,614 a 2,794 GHz.

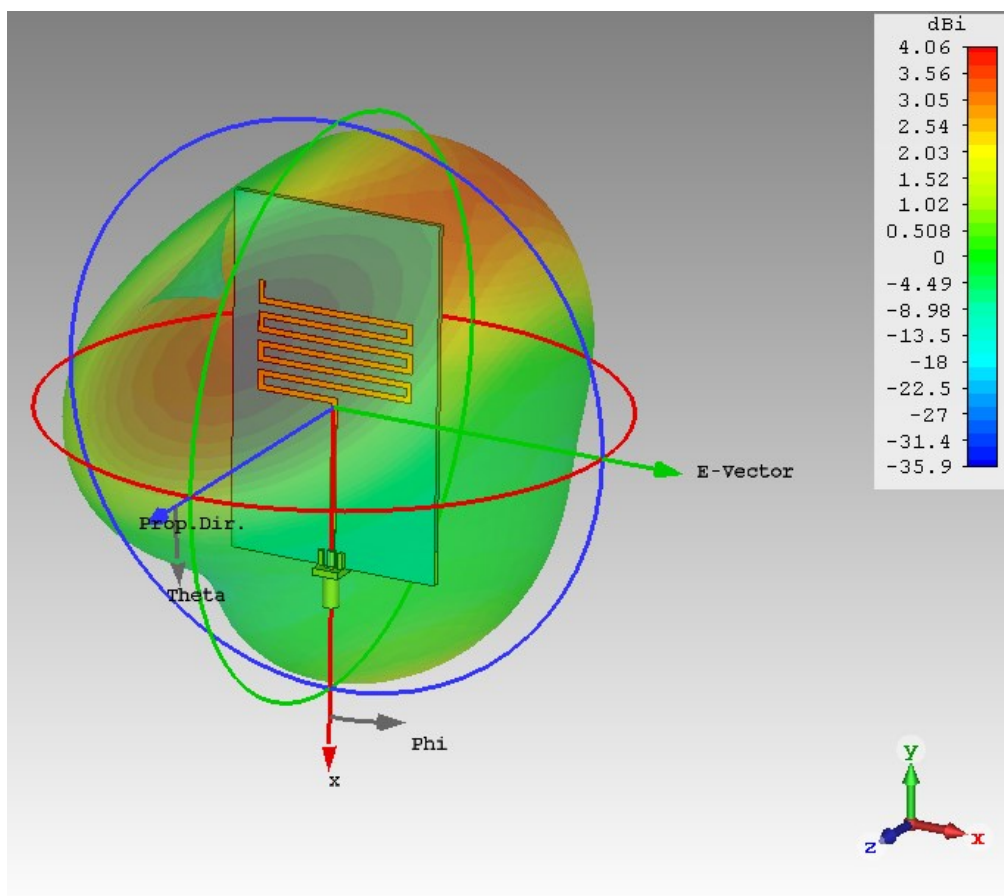
Tabulka 3.3: Shrnutí dosažených výsledků jednotlivých modelů po optimalizaci

Model	PSV	S_{11} [dB]	Šířka pásma [MHz]
1	1 : 1	-66,19	2370–2545 (175)
2	1,05 : 1	-32,9	2438–2466 (28)
3	1,04 : 1	-35,12	2406–2496 (90)



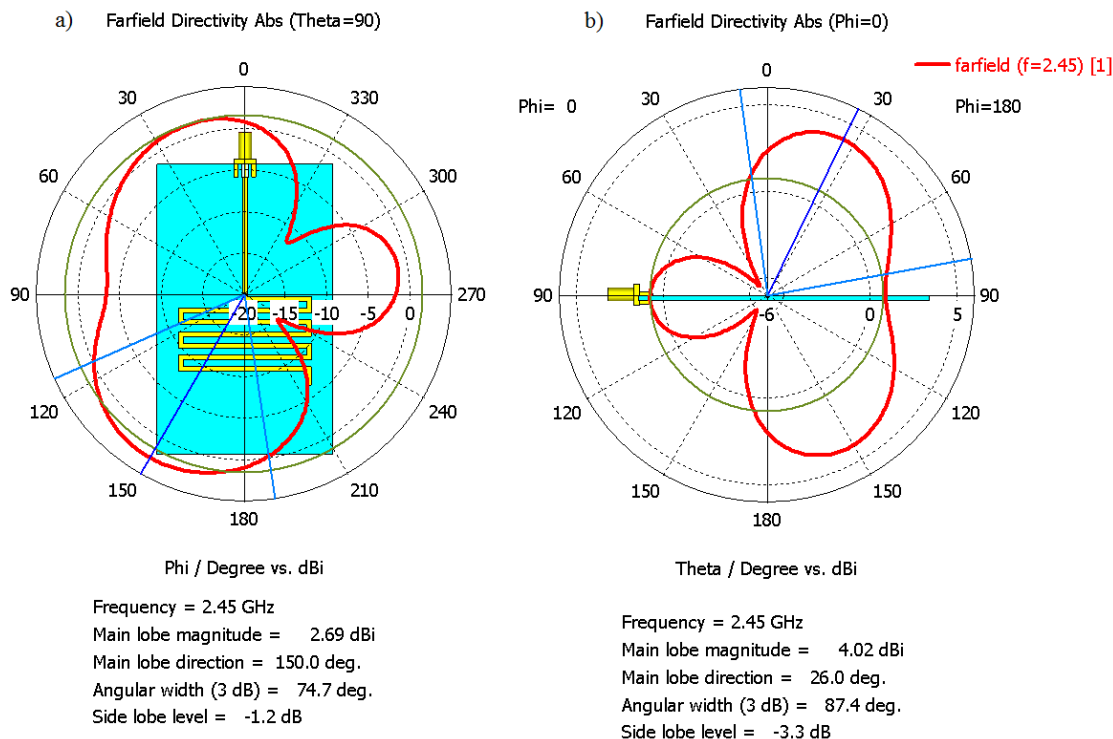
Obrázek 3.18: Graf šířky použitelného pásma meandrové antény po optimalizaci

Dalším velmi podstatným výsledkem simulace je analýza vzdáleného pole. Monitor byl nastaven na statickou hodnotu kmitočtu 2,45 GHz. Výsledný zisk a vyzářovací diagramy antény po provedení simulace se nachází v záložce „Farfields“. Výsledné směrové charakteristiky se nachází na obrázcích 3.20, kde je zobrazen řez vertikální (svislou) a horizontální rovinou. Diagram záření je také k dispozici ve 3D náhledu viz obr. 3.19.



Obrázek 3.19: *Materiál ASTRA MT 77 - 3D vyzařovací diagram*

Z vyzařovacího diagramu v pohledu 3D lze pozorovat všesměrový charakter antény. Grafy směrovosti popisují absolutní hodnotu zisku a úhlovou šířku hlavního laloku ve vertikální a horizontální rovině. Již z 3D náhledu diagramu záření vyplývá, že hlavní směr vyzařování se nachází někde v místech nad a pod anténou. Šířka hlavního laloku v případě směrové vertikální charakteristiky je $87,4^\circ$ a absolutní zisk dosahuje hodnoty 4,02 dBi. V charakteristice horizontální je šířka hlavního laloku $74,7^\circ$ a absolutní zisk je v tomto směru nižší 2,69 dBi.



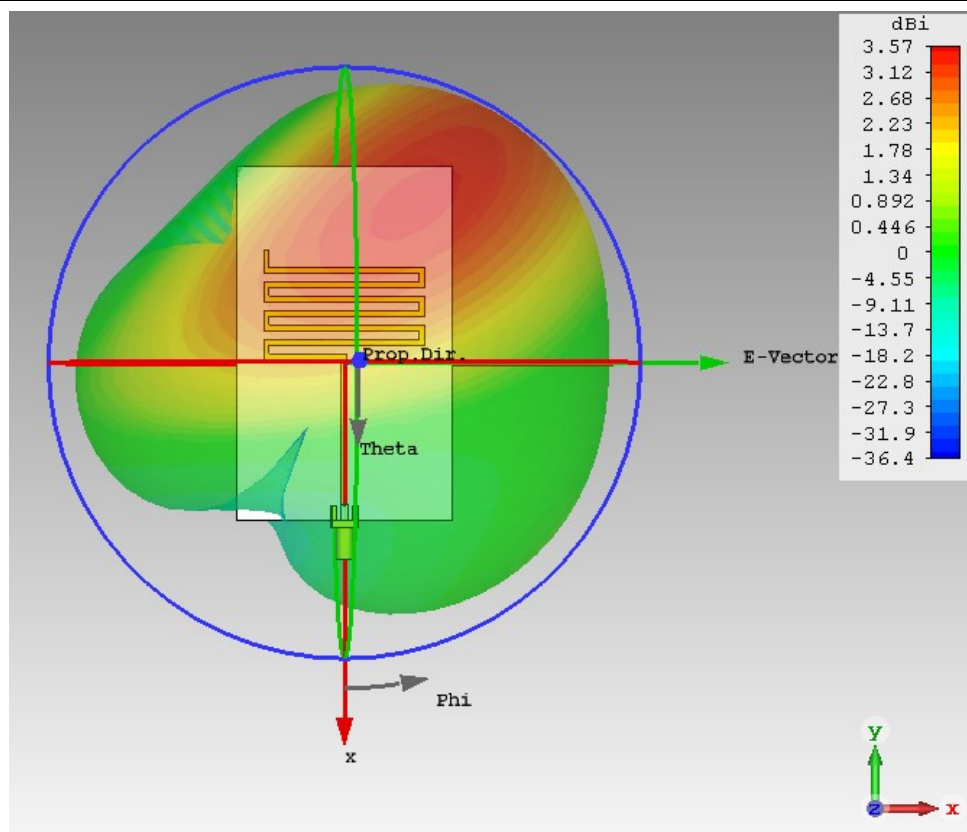
Obrázek 3.20: Materiál ASTRA MT 77- Směrová charakteristika a) horizontální b) vertikální

3.6 Vliv materiálu substrátu

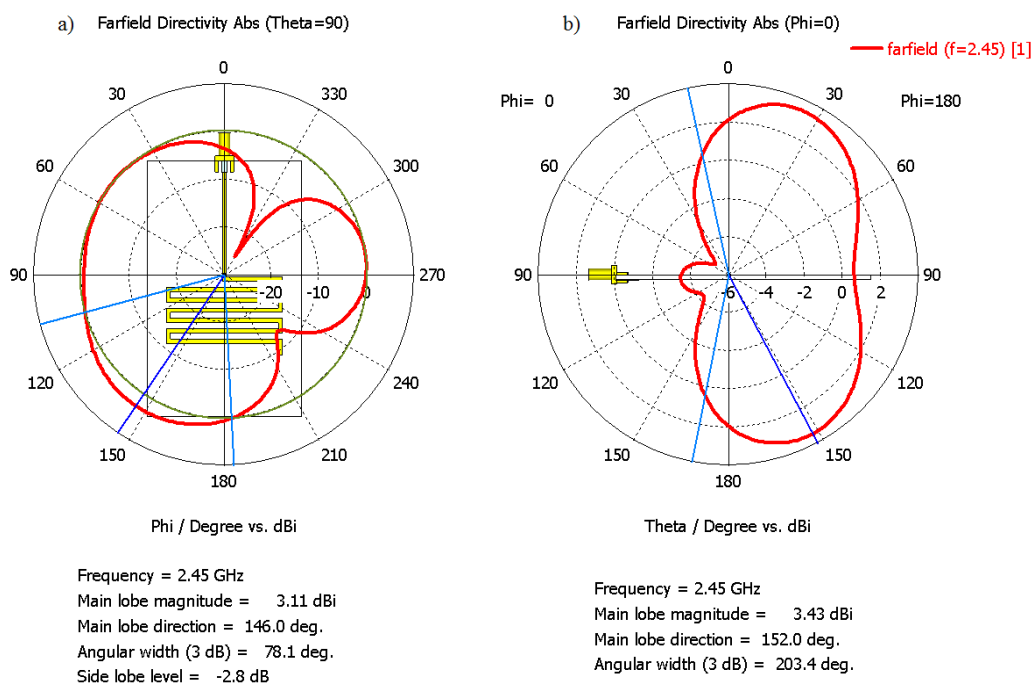
Vliv substrátu byl testován prostřednictvím simulací a rozdělen do dvou částí. Pro demonstrativní účely byly zvoleny rozměry modelu č. 1. První část tohoto testování zahrnuje záměnu materiálu substrátu s neměnnými (statickými) rozměry viz technický náčrt na obr. 3.3. Důsledkem záměny materiálu dochází k změně relativní permitivity a parametru rozptylu. Sledujeme pouze nejdůležitější parametry. Jedná se striktně o monitorování S_{11} , PSV a vyzařovacího diagramu meandrové antény (zisk, rozptyl vyzařovacích úhlů). Výsledné anténní parametry na substrátu ASTRA MT 77 jsou také součástí porovnání vlivu substrátu. Ovšem jejich demonstrace již proběhla v podkapitole 3.4, jež byla věnována optimalizaci. Hodnoty S_{11} a PSV jsou uvedeny v závěru této kapitoly prostřednictvím sloučených grafů realizovaných v programu MATLAB. Grafy PSV vedle grafů S_{11} sice nepřinášejí žádnou doplňující informaci, ale pro případ vyjádření kvality impedančního přizpůsobení se jeví jako názornější.

- **Test materiálu FR4**

V simulačním prostředí CST se tento materiál vyznačuje relativní permitivitou $\epsilon_r = 4,3$ a rozptylovým faktorem $\tan \delta = 0,025$. Jedná se o velmi laciný a na trhu snadno dostupný materiál. Z důvodů zmíněných v podkapitole 3.2.2 byl materiál substrátu využit pouze v simulacích. Slouží pouze k porovnání vlivu materiálu na výsledné anténní parametry.



Obrázek 3.21: Materiál FR4 – 3D směrová charakteristika

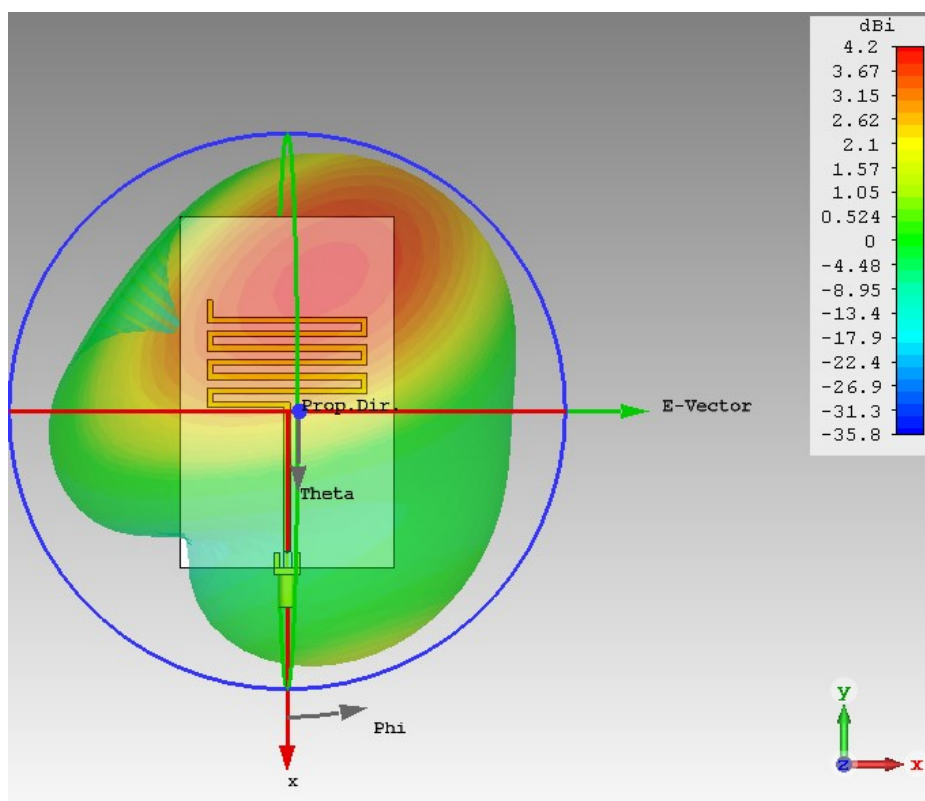


Obrázek 3.22: Materiál FR4 – Směrová charakteristika a) horizontální b) vertikální

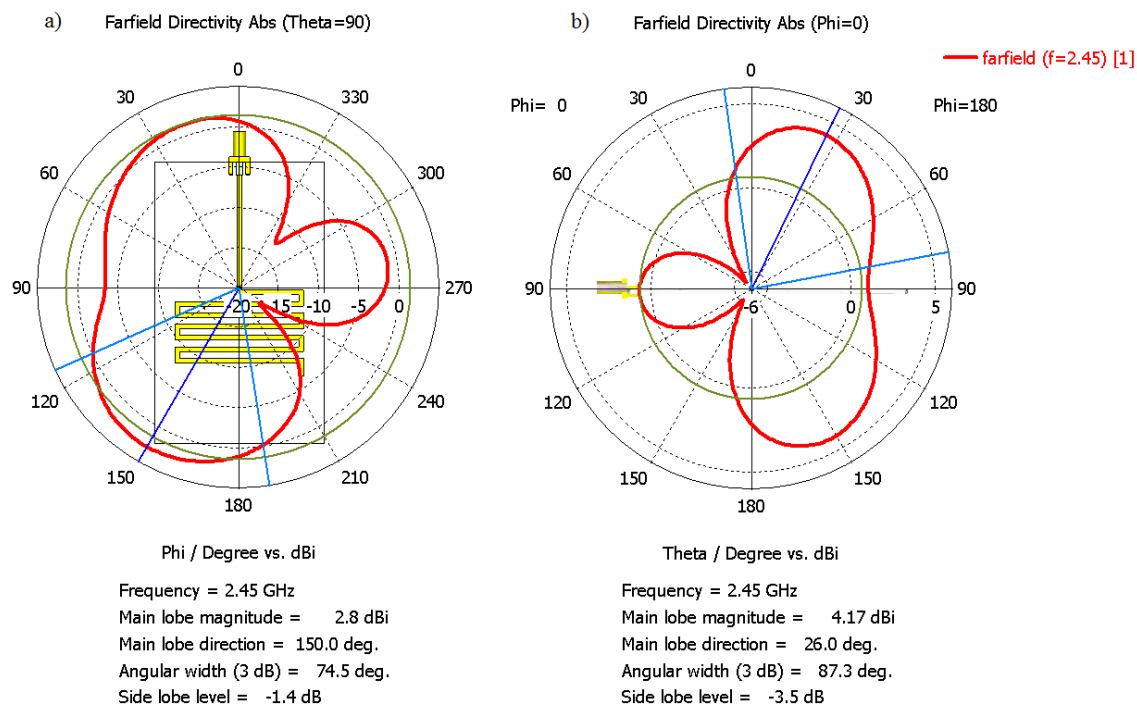
Při využití materiálu FR4 a statických rozměrech antény došlo k nežádoucímu přeladění rezonančního kmitočtu na hodnotu 2,207 GHz. Anténa se vyznačuje značně horším impedančním přizpůsobením, než je tomu v případě využití materiálu ASTRA MT77 a Rogers 3003. Výsledná vyzařovací charakteristika se svým tvarem příliš neliší. V jednotlivých vertikálních a horizontálních řezech směrových charakteristik dochází ke změnám maximálního rozptylu úhlů a ziskovosti v pozorovaném směru maxima. Absolutní zisk je v případě využití materiálu FR4 nejnižší ze všech tří testovaných případů 3,57 dBi. Ve vertikálním řezu dochází k potlačení postranního laloku a šířka hlavního laloku je $203,4^\circ$, tzn. je značně širší než v případě jiných materiálů. Zisk dosahuje 3,11 dBi v horizontální a 3,43 dBi ve vertikální rovině. Při tomto posuzování musíme brát zřetel na to, že anténa není přizpůsobená na zadaný kmitočet. Výsledky všech testovaných materiálů a jejich důsledky na sledované parametry jsou sepsány v tabulce č. 3.4.

- **Test materiálu Rogers 3003**

Tento materiál se vyznačuje stejnou relativní permitivitou jako typ ASTRA MT77 $\epsilon_r = 3$ a nižším rozptylovým faktorem $\tan \delta = 0,0013$. Výroba antény s využitím tohoto typu materiálu by byla příliš nákladná. Jedná se o práci s omezeným rozpočtem, proto byl tento materiál substrátu využit pouze v simulacích. Slouží k porovnání vlivu materiálu na výsledné anténní parametry.



Obrázek 3.23: Materiál Rogers 3003 – 3D směrová charakteristika

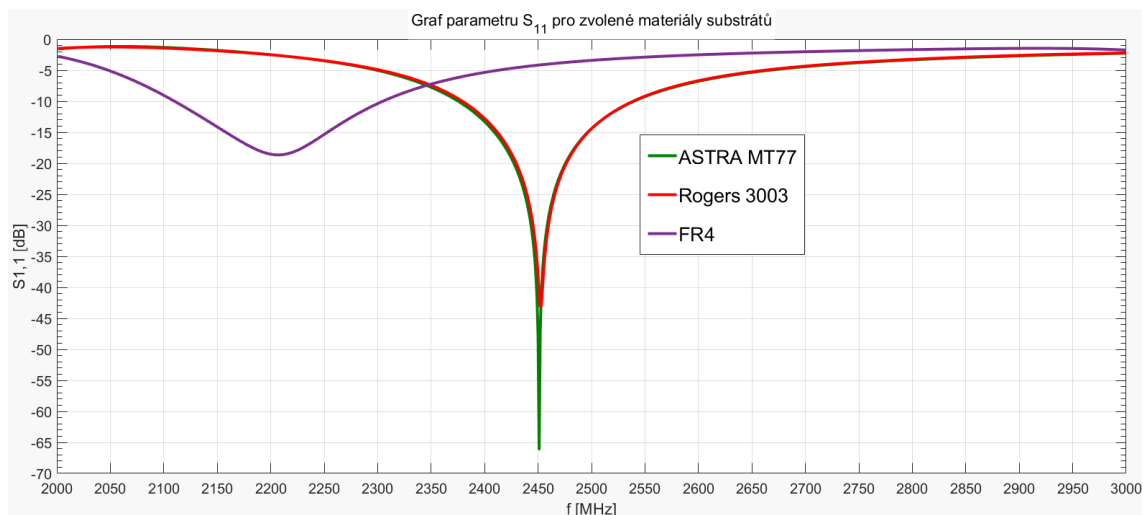


Obrázek 3.24: Materiál Rogers 3003 – Směrová charakteristika a) horizontální b) vertikální

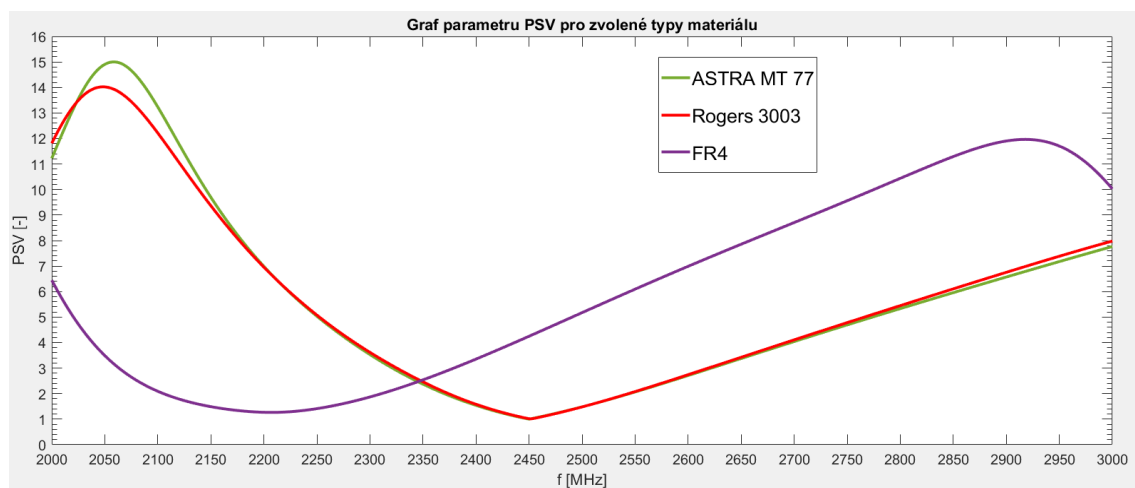
Co se týče absolutní ziskovosti, tak materiál Rogers 3003 je vítězem s výslednou hodnotou 4,2 dBi. Dle mého názoru je to způsobeno lehce nižší hodnotou rozptylového faktoru. V horizontální rovině dosahuje slušného zisku 2,8 dBi a ve vertikální nejvyššího ze všech testovaných materiálů 4,17 dBi. Rozpětí úhlů hlavních laloků jsou v horizontální rovině 74,5° a vertikální 87,3°. V obou rovinách jsou výsledky srovnatelné s materiálem ASTRA MT77.

Tabulka 3.4: Shrnutí výsledků změn materiálů substrátu a její dopad na sledované parametry při $f = 2,45 \text{ GHz}$

Materiál	Abs. zisk vertikální směrová char. [dBi]	Abs. zisk horizontální směrová char. [dBi]	S_{11} [dB]	PSV na kmitočtu 2,45 GHz [-]
FR4	3,43	3,11	-4	4,2 : 1
Rogers 3003	4,17	2,8	-40	1,01 : 1
ASTRA MT 77	4,02	2,69	-62,2	1,001 : 1



Obrázek 3.25: Vliv testovaného materiálu na parametr S_{11}



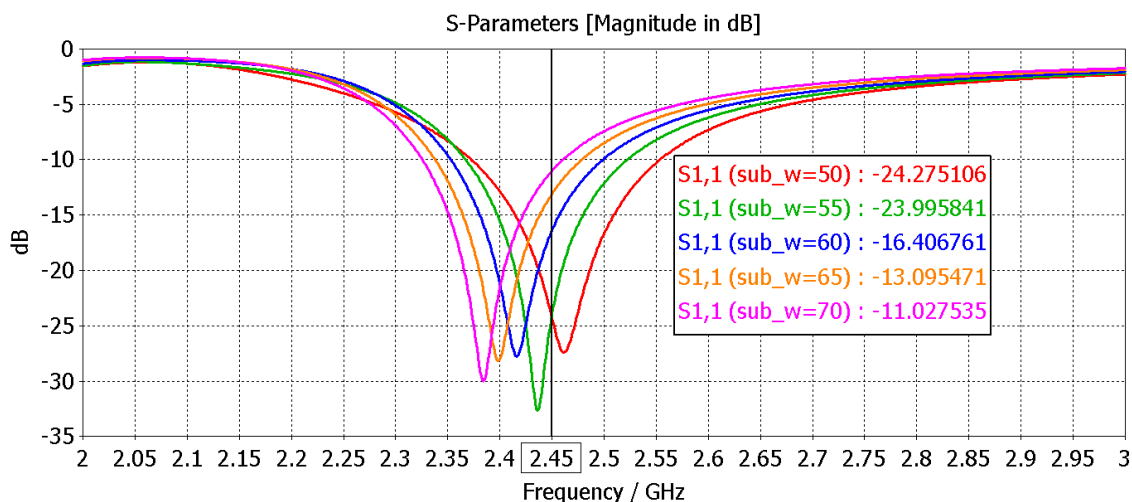
Obrázek 3.26: Vliv testovaného materiálu na parametr PSV

Obrázky 3.25 a 3.26 znázorňují rozdíl mezi všemi typy testovaných substrátů v závislosti na parametrech přizpůsobení S_{11} a PSV. Nejlepšího přizpůsobení dosahuje anténa, která je umístěna na substrátu ASTRA MT 77 s hodnotami PSV 1,001 : 1 a zpětného odrazu S_{11} -66,19 dB. Materiál ASTRA MT 77 je levnější alternativou pro reálnou výrobu meandrové antény. Proto byl zvolen jako výchozí pro potřeby simulací a následné optimalizace. Substrát Rogers 3003 by nepatrně zvýšil ziskovost antény, zejména ve vertikální rovině, zato by rapidně zvýšil celkovou cenu výroby. Z těchto poznatků se odvíjí reálná výroba meandrové antény.

3.7 Vliv výšky a šířky substrátu

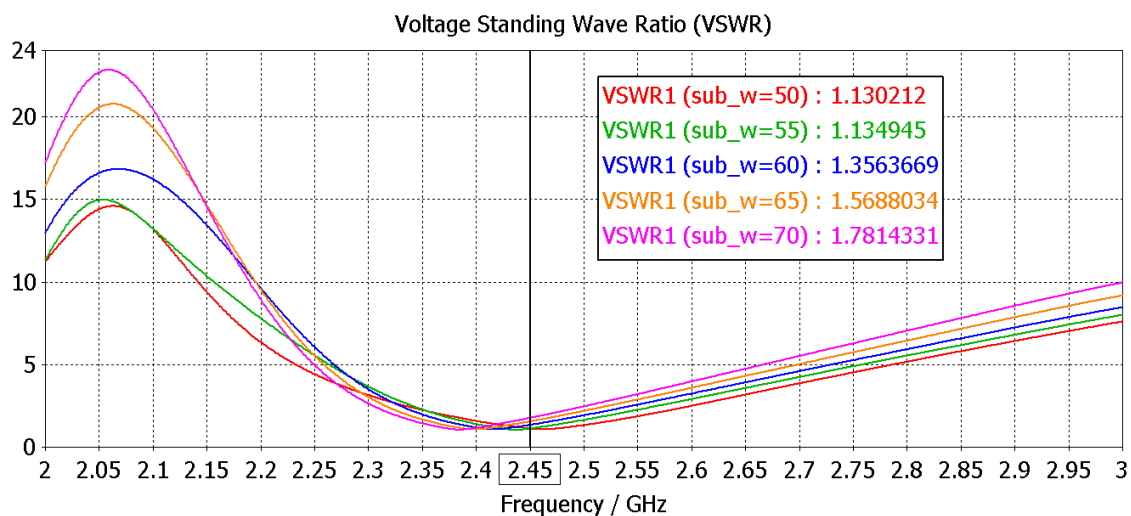
Druhá část se zabývá změnami výšky a šířky substrátu ASTRA MT 77 modelu č. 1 a jejími dopady na chování parametrů S_{11} , PSV a směrové vyzařovací charakteristiky.

- **Změna šířky substrátu**

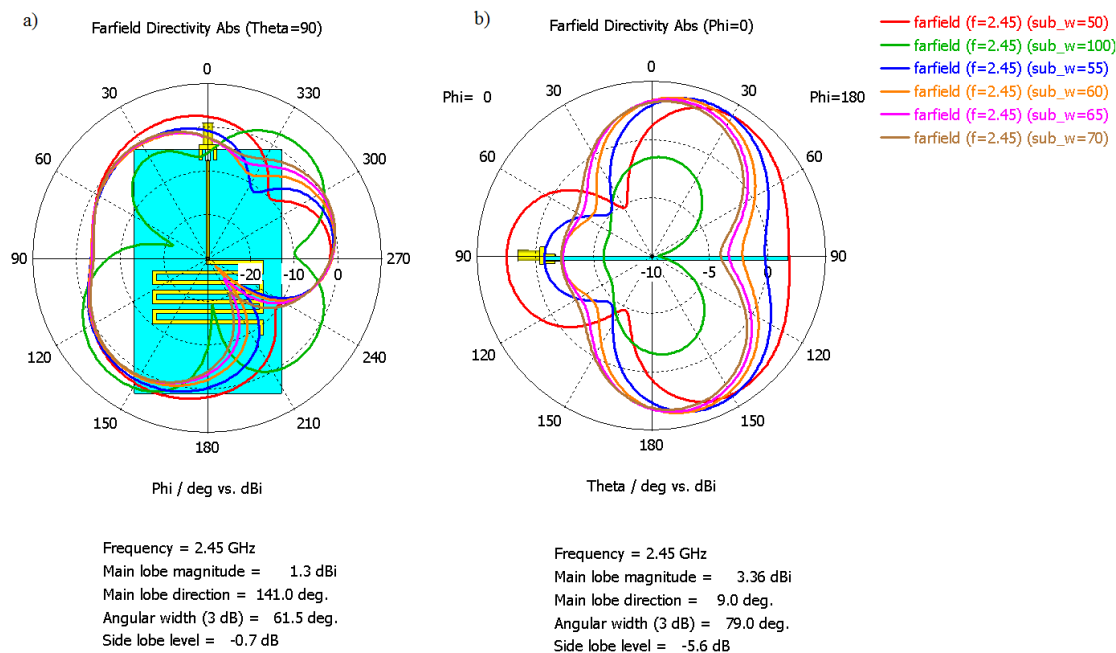


Obrázek 3.28: *Vliv změny šířky substrátu na parametr PSV*

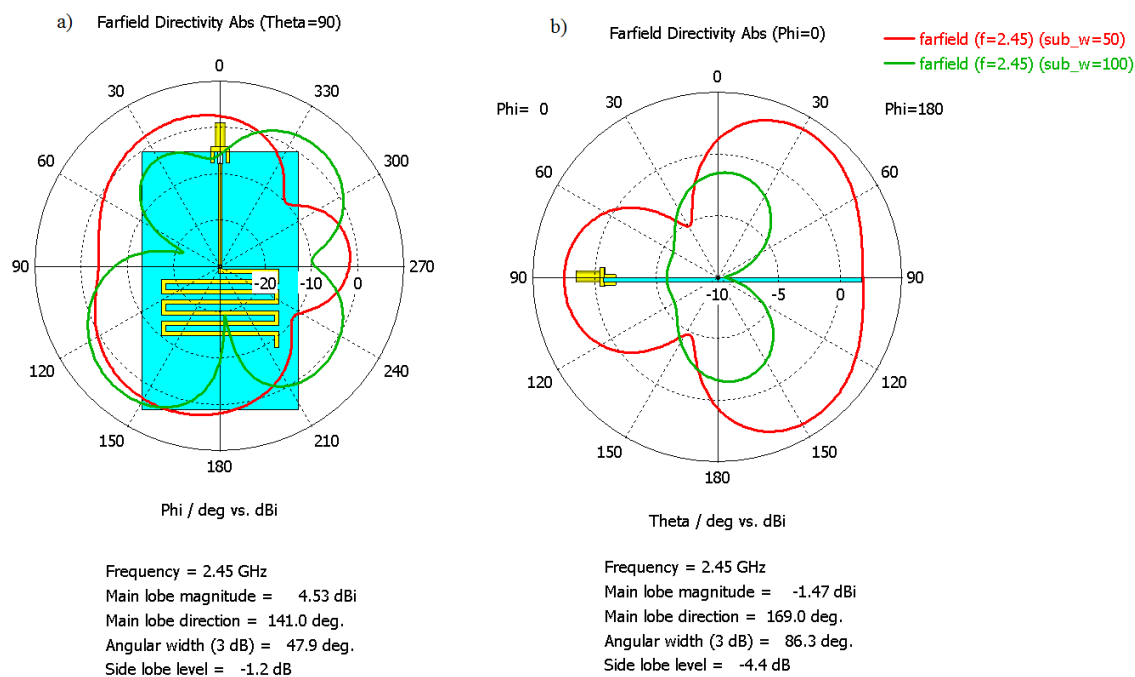
Simulace byla nastavena na výchozí hodnotu šířky substrátu 50 mm a poté se s krokem 5 mm postupně navyšovala. S rostoucí šířkou substrátu rezonanční kmitočet klesá, a naopak s klesající šířkou roste. Mění se šířka má také neblahý vliv na přizpůsobení antény, lze vidět, že už při 70 mm je parametr PSV roven 1 : 1,78. Tato hodnota je stále dostačující, ale již pomalu hraničí s přípustným limitem pro planární typ antény.



Obrázek 3.27: *Vliv změny šířky substrátu na parametr S₁₁*



Obrázek 3.29: Směrová charakteristika – změna šířky substrátu a) horizontální b) vertikální

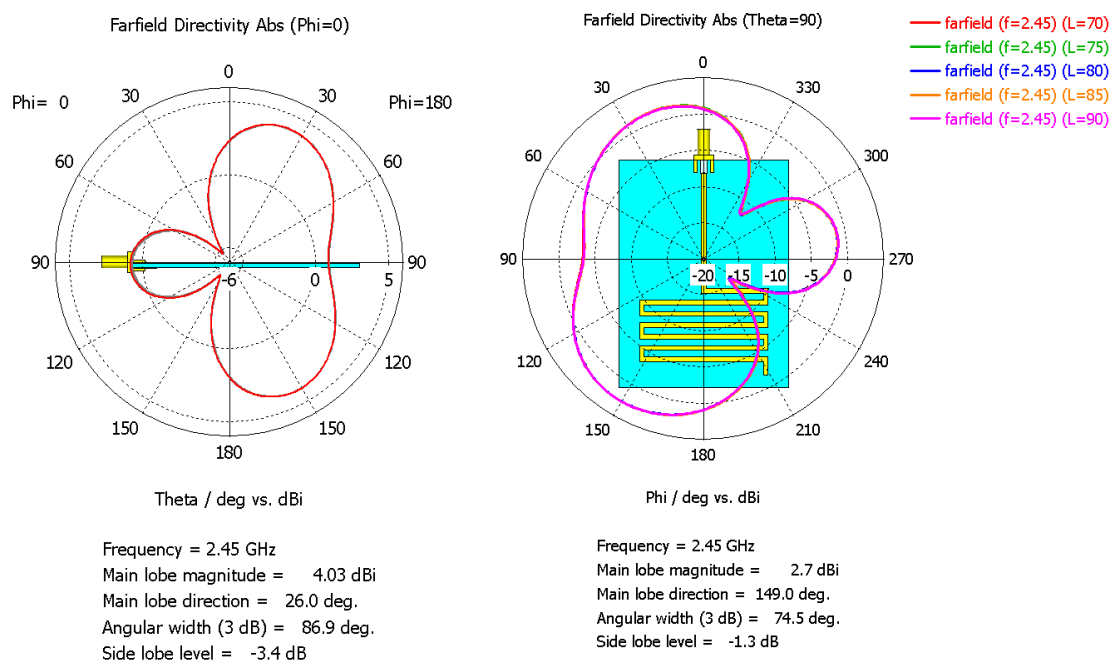


Obrázek 3.30: Směrová charakteristika – změna šířky substrátu a) horizontální b) vertikální

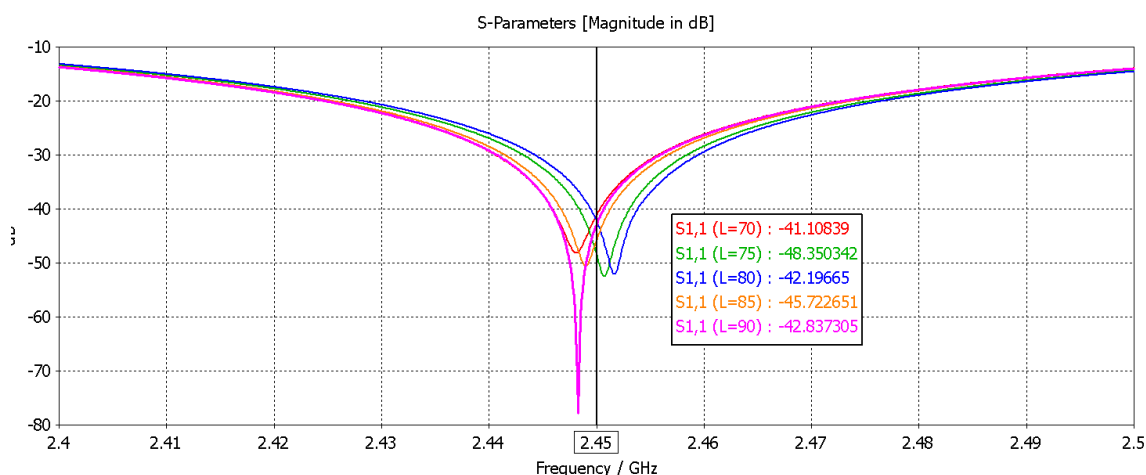
Šířka značně ovlivňuje i tvar vyzařovacího diagramu, zisk a rozptyl úhlu hlavního laloku. Obr. 3.29 popisuje změnu v krocích o velikosti 5 mm. Pro zpřesnění je zde přiložen graf 3.30, jenž obsahuje změnu z 50 mm na 100 mm. Deformace je značná. V horizontálním řezu dochází k vzniku dalších postranních laloků a snižuje se šířka hlavního laloku. Jeho rozsah činí 47,9°.

Jelikož se jeví horizontální charakteristika jako směrovější, zisk tak nabývá vyšších hodnot a sice 4,53 dBi. Vertikální charakteristika drží tvar, hlavní lalok nabývá rozsahu $86,3^\circ$ podobně jako je tomu v případě optimální šířky 52,52 mm, ovšem zisk klesl na pouhých -1,47 dBi.

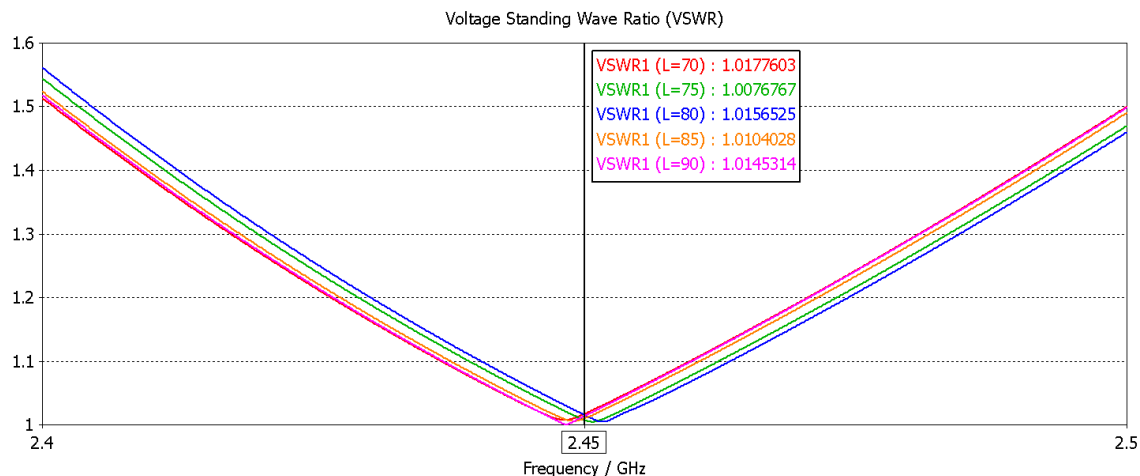
- **Změna výšky substrátu**



Obrázek 3.31: Vliv změny výšky substrátu na směrovou charakteristiku a) horizontální b) vertikální



Obrázek 3.32: Vliv změny výšky substrátu na parametr S_{11}



Obrázek 3.33: *Vliv změny výšky substrátu na parametr PSV*

Změna výšky substrátu příliš výsledné anténní parametry neovlivnila. Směrové charakteristiky se neliší v porovnání s optimální výškou 86,77 mm. Z grafů S_{11} a PSV lze pozorovat pouze nepatrné změny. V této situaci by bylo rozumné uvažovat o přizpůsobení délky substrátu L tak, aby svou velikostí vyhovovala patřičné aplikaci. Výslednou anténu by teoreticky šlo zkrátit cca na hodnotu $L = 70$ mm. Tato velikost je považována za nedestruktivní a výsledky simulací splňují požadavky funkčnosti antény na zadaném kmitočtu. U S_{11} by nastal nárůst minima z hodnoty -66,19 na hodnotu -41,1 dB.

4 Praktická realizace meandrové antény

Poslední kapitola diplomové práce se zabývá praktickou realizací, sestrojením a kontrolním ověřením vlastností vyhotovených meandrových antén.

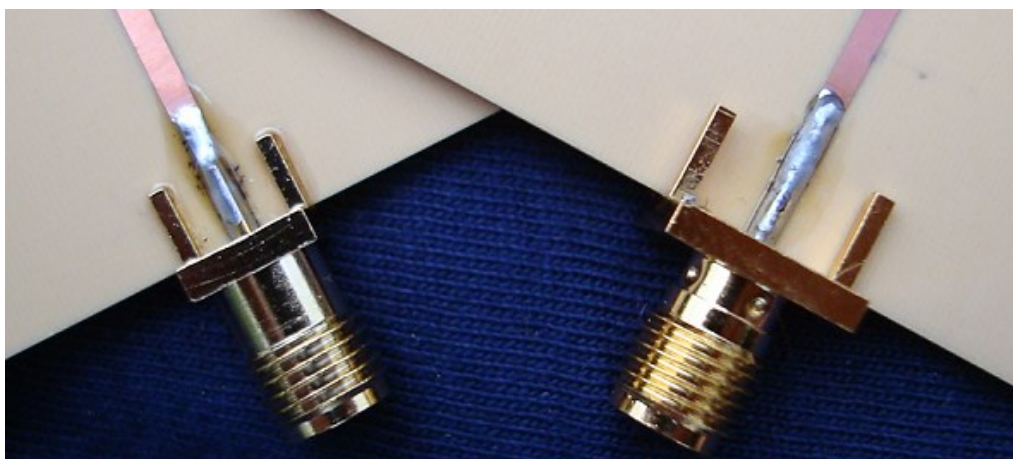
4.1 Výroba

Anténní návrh obsahuje příliš malé rozměry a její konstrukci tvoří těžko sehnatelný materiál substrátu, jenž je velmi vhodný pro vyšší kmitočty. Výroba byla realizována ve firmě, která se specializuje na precizní výrobu jedno, dvou a vícevrstevných DPS (desek plošných spojů).

Proto byla pro výrobu oboustranné DPS zvolena varianta fotocesty, jež patří mezi nejpoužívanější a nejpresnější metody výroby. Principem fotocesty je osvětlení předlohy na fotocitlivou vrstvu umístěnou na desce. Tato metoda vyžaduje velmi čisté prostředí a nanášené vrstvy musí být rovnoměrné. Důraz je kladen také na opatrnost, protože leptací roztoky, jež se využívají pro odleptání nepotřebné vodivé vrstvy, jsou nebezpečné chemikálie. K osvětlení jsou používány rovněž nebezpečné zdroje UV záření. Potřebné předlohy se připravují na obyčejný papír formou výtisků laserovou, popř. inkoustovou tiskárnou. Nevýhoda využití inkoustové tiskárny spočívá v nechtěném rozpíjení motivu.

Nejprve bylo nutné vyexportovat z programu CST patřičné výstupy modelů s rozměry ve formátu gerber společně s okótovanými motivy všech tří navržených meandrových antén. Jednotlivé motivy byly zpracovány a patřičně okótovány v programu AUTOCAD LT 2015.

Na zakoupenou desku o rozměrech 20 × 30 cm v hodnotě cca 1500 Kč se povedlo obsadit celkem sedm kusů meandrových antén. Model č. 1 je vyhotoven 3x a další dva modely jsou poté v páru. V další fázi bylo nutné na vstup těchto sedmi antén napájet konektory. Nakonec byly zvoleny dva typy. Čtyři kvalitnější a rozměrnější VF konektory v dražší cenové relaci a tři poměrně levné typy jejichž rozměry byly reprezentovány v návrhu modelu prostřednictvím simulací. Jedná se o SMA VF konektory uzpůsobené na připojení přímo k DPS. Detail napájených konektorů a jejich rozdíl zejména ve velikosti lze sledovat na obr. č. 4.1.



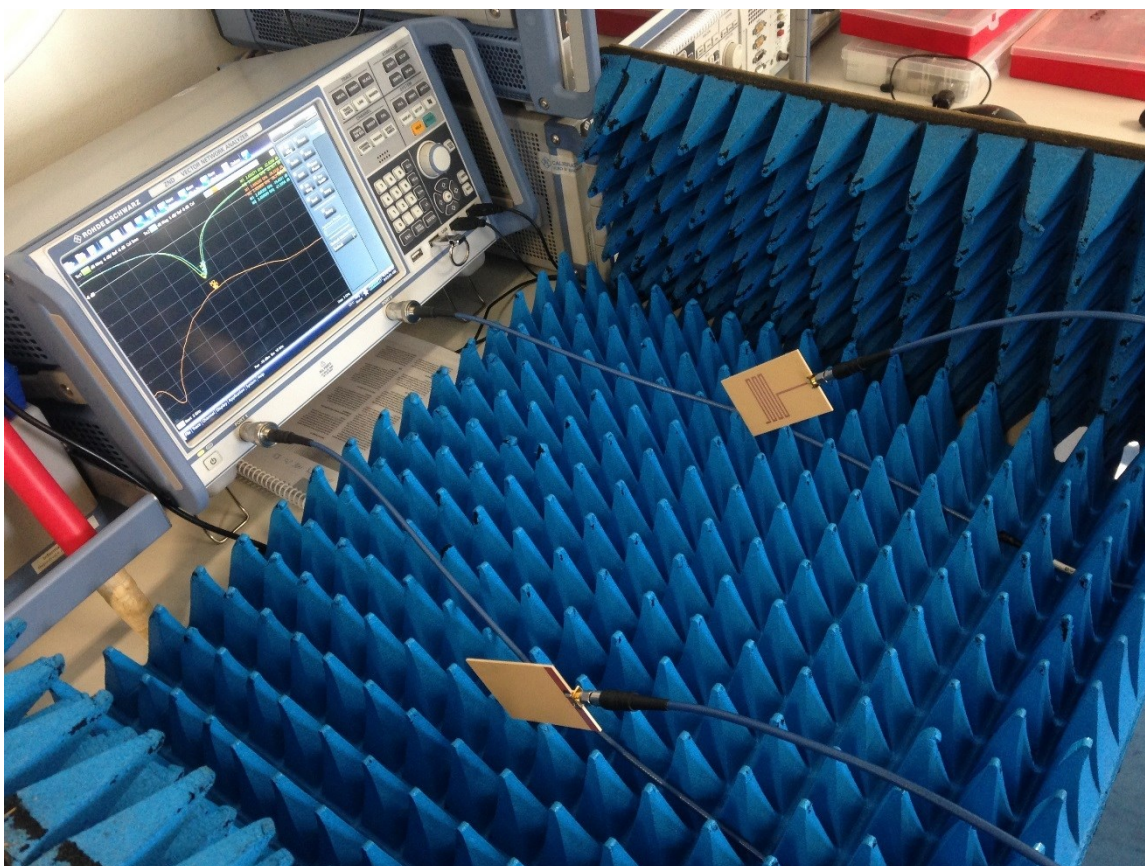
Obrázek 4.1: Detail konektorů - levnější varianta vlevo, v pravo varianta dražší

Výsledné modely jsou přizpůsobeny k laboratorním podmínkám, manipulaci a danému měření.

4.2 Ověření správnosti návrhu antény měřením

V této fázi byla kontrolována správnost anténního návrhu měřením v laboratoři. Náhled měřicího pracoviště je vyobrazen níže na obr 4.2. Měření S_{11} a PSV probíhalo za pomoci dvou-portového vektorového síťového ZND analyzátoru značky Rohde&Schwarz. Měřicí přístroj je určen pro kmitočtový rozsah 100 kHz až 4,5 GHz, rozsah je možno rozšířit na 8,5 GHz. Analyzátor se využívá pro měření nejrůznějších anténních vlastností, například k měření S-parametrů dvojbranu, jež jsou nezbytné pro popis vysokofrekvenčních obvodů. Parametry S_{11} a S_{22} mají význam reflexních (odrazivých) koeficientů. Koeficienty přenosu poté reprezentují parametry S_{21} a S_{12} .

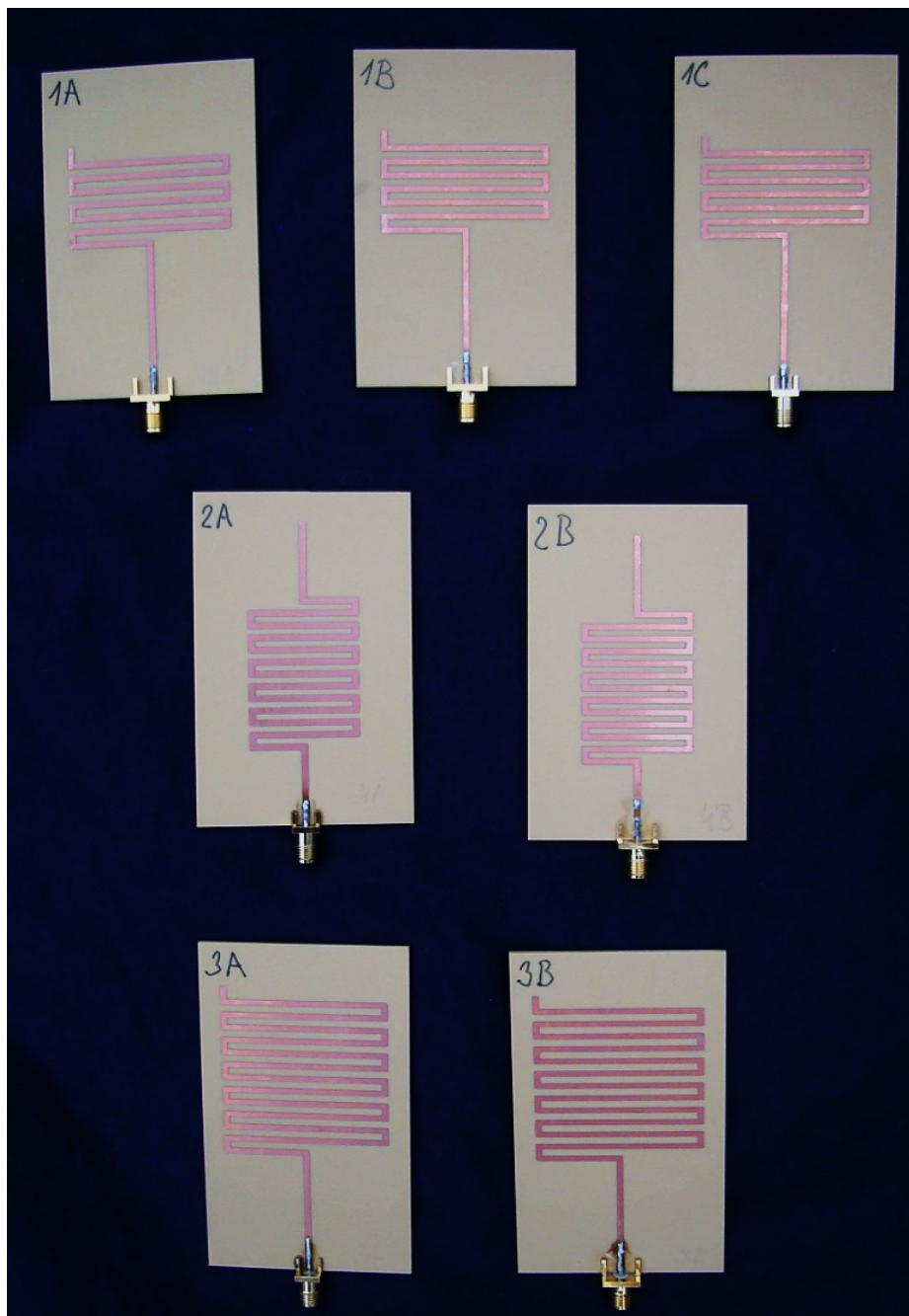
Měření bylo omezeno vybavením laboratoře striktně na měření vstupního koeficientu odrazu S_{11} při výstupu zakončeném přizpůsobenou zátěží ($Z_L = Z_0$) a podružného parametru PSV. Součástí měření impedančního přizpůsobení je Smithův diagram, který je součástí tištěné přílohy. Následně byl změřen zisk dvou neznámých antén reciproční metodou. Pro měření zisku byly využity antény 1A a 1B. Fotografie z měření je umístěna v příloze E.



Obrázek 4.2: Náhled měřicího pracoviště – stanoviště č. 1

4.3 Výsledky měření

Výsledky měření jednotlivých modelů byly exportovány z analyzátoru v datovém formátu a následně importovány do programu MATLAB, kde byly zpracovány a přetvořeny do podoby grafů. Naměřené výsledky S_{11} a PSV jsou srovnány s výsledky simulací. Modely jsou přehledně označeny svým identifikačním číslem, aby nedošlo k jejich záměně viz obr. 4.3.



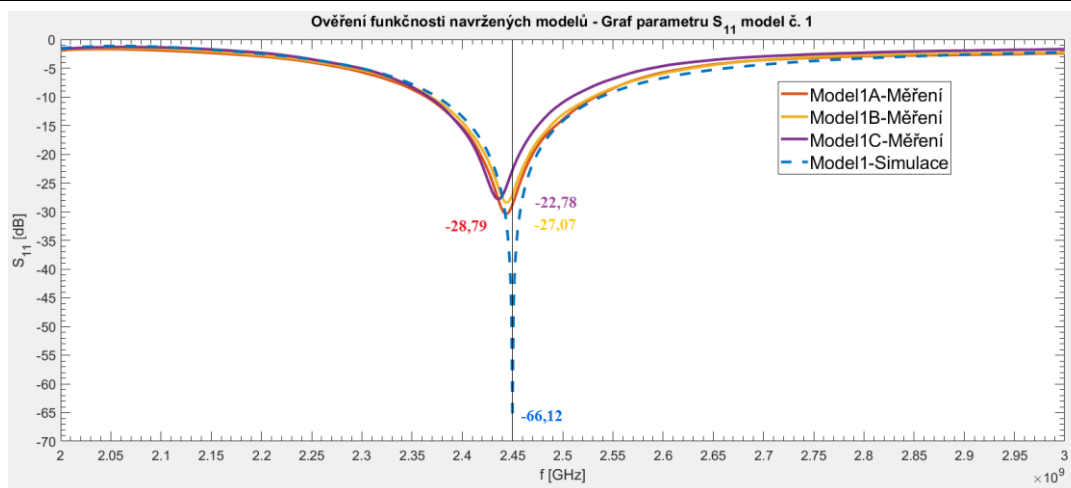
Obrázek 4.3: Označení jednotlivých vyrobených modelů

4.3.1 Měření parametru S_{11} a PSVTabulka 4.1: Naměřené hodnoty PSV a S_{11} jednotlivých modelů

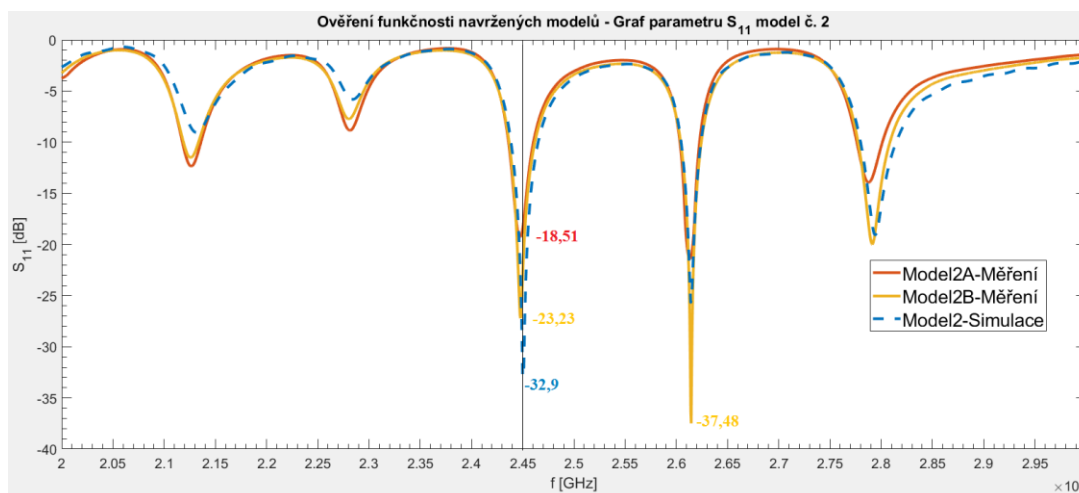
Model	PSV	S_{11} [dB]	Šířka pásma [MHz]
Model – 1A	1,08 : 1	-28,79	2353–2537 (184)
Model – 1B	1,128 : 1	-27,07	2370–2532 (162)
Model – 1C	1,215 : 1	-22,78	2365–2512 (147)
Model 1 – Simulace	1,001 : 1	-66,19	2370–2545 (175)
Model – 2A	1,283 : 1	-18,51	2437–2461 (24)
Model – 2B	1,141 : 1	-23,23	2436–2463 (27)
Model 2 – Simulace	1,046 : 1	-32,9	2438–2466 (28)
Model – 3A	1,137 : 1	-27,03	2406–2520 (114)
Model – 3B	1,102 : 1	-25,91	2395–2542 (147)
Model 3 – Simulace	1,036 : 1	-35,12	2406–2496 (90)

Nepříznivých vlivů, jež mohly ovlivnit celkový výsledek impedančního přizpůsobení a zároveň způsobit nepatrný posun rezonančního kmitočtu, je mnoho. Hlavní příčinou bude nejpravděpodobněji nepřesné napájení konektorů antén. Nachází se zde rozdílné množství cínu v porovnání s navrženými modely v simulacích. Za další příčinu bychom mohli uvažovat vliv konektorů, protože pro připojení k napájecí byly využity dva typy rozdílné kvality. Tyto drobné nepřesnosti mohly vést k změně hodnoty impedance na vstupu antény. Z naměřených výsledků je zřejmé, že návrhy všech modelů byly relativně přesné a výrobky svými výsledky téměř korespondují se simulovanými hodnotami.

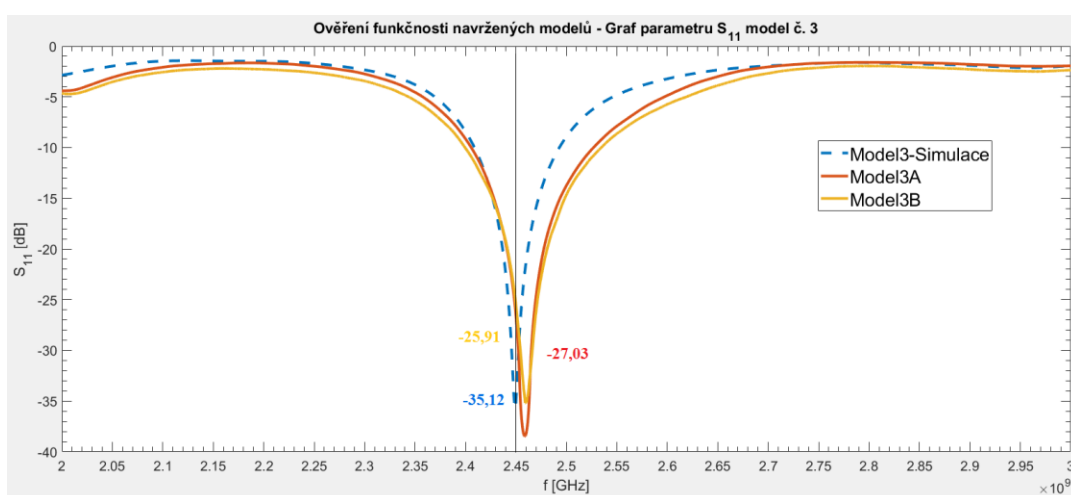
Výsledky simulací jsou v grafech S_{11} vyobrazeny čárkovaně modrou barvou. U modelů s označením 1A, 1B, 2B a 3B byl využit dražší typ konektoru, který se jeví jako kvalitnější v porovnání s výsledky modelů 1C, 2A a 3A s méně kvalitní, levnější variantou. Pokud srovnáme modely pod označením 1A a 1C s totožnými motivy a rozdílným typem konektoru, je vidět znatelný rozdíl v naměřeném koeficientu odrazivosti i podřadném PSV. Model 1A dosahuje hodnot S_{11} -28,79 a 1C -22,78 dB, což činí rozdíl -6,01 dB. V případě modelu 2A a 2B je zaznamenán rozdíl -4,72 dB. Model 2A a 2B je navíc vícepásmový. Pro variantu 2A se konkrétní minima S_{11} , které splňují přípustnou hodnotu -10 dB nachází na kmitočtech 2127, 2614 a 2787 MHz, pro variantu 2B pak 2126, 2615 a 2791 MHz. Výjimku tvoří měření modelu 3. Pouze v tomto případě byl zaznamenán posun minima S_{11} do oblasti vyšších kmitočtů, kdežto u všech ostatních došlo k posunu minima do oblasti kmitočtů nižších. Co se týče šířky pásma, tak modely 1A, 3A a 3B dopadly lépe než v případě simulovaných hodnot. Opět byly využity grafy PSV 4.7, 4.8 a 4.9, jež jsou rovnou oříznuty a přiblíženy, aby nepřesahovaly hraniční hodnoty poměru 2 : 1.



Obrázek 4.4: Kontrolní měření parametru S_{11} vyrobeného modelu č. 1

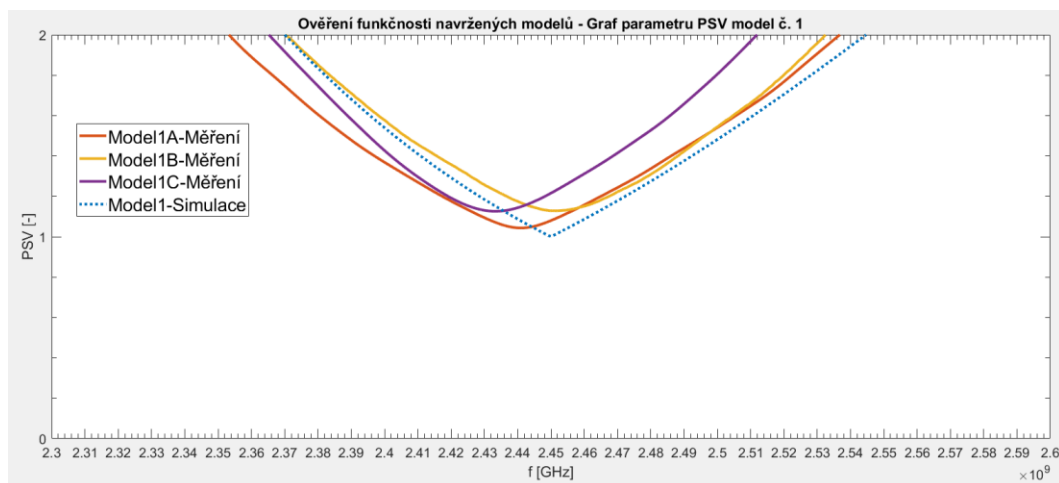


Obrázek 4.5: Kontrolní měření parametru S_{11} vyrobeného modelu č. 2

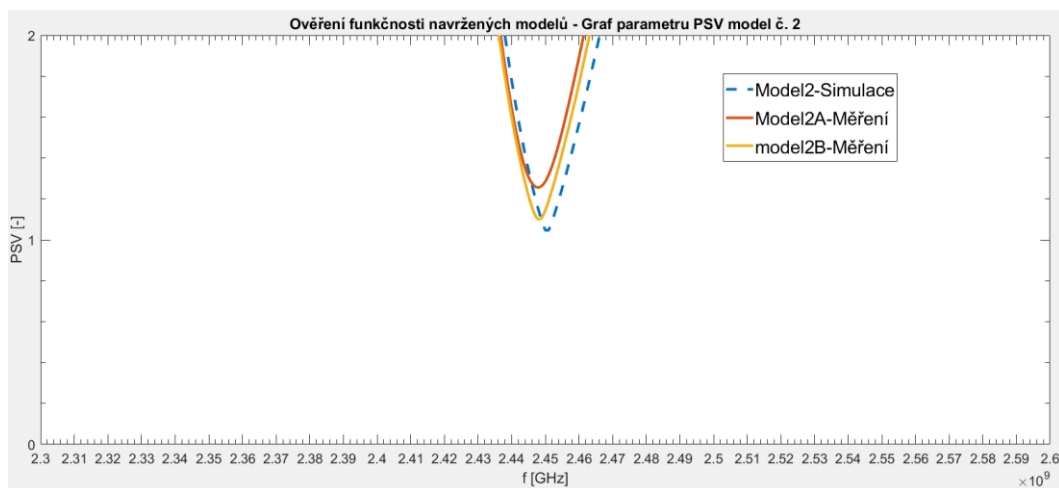


Obrázek 4.6: Kontrolní měření parametru S_{11} vyrobeného modelu č. 3

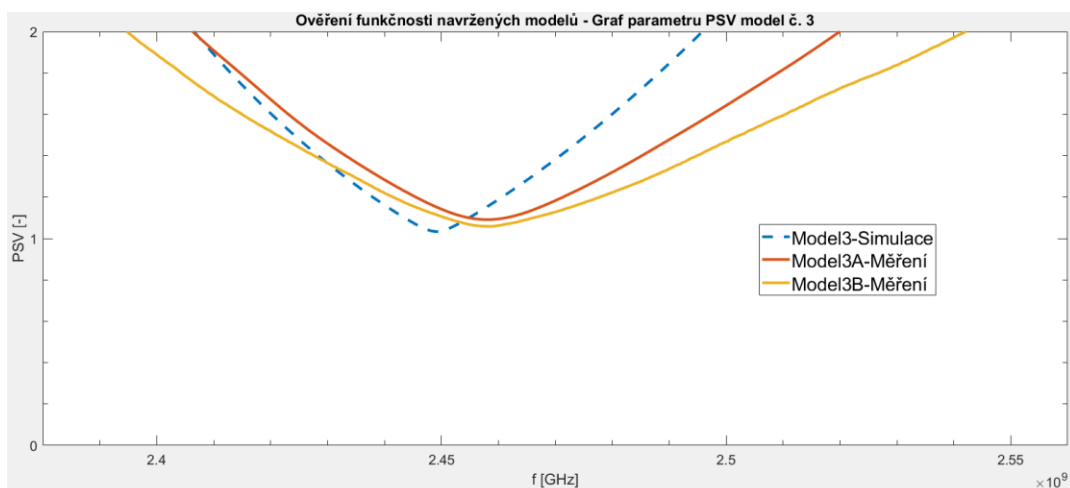
- Šířka pásma odvozená z grafů PSV s hraniční hodnotou poměru $< 2 : 1$



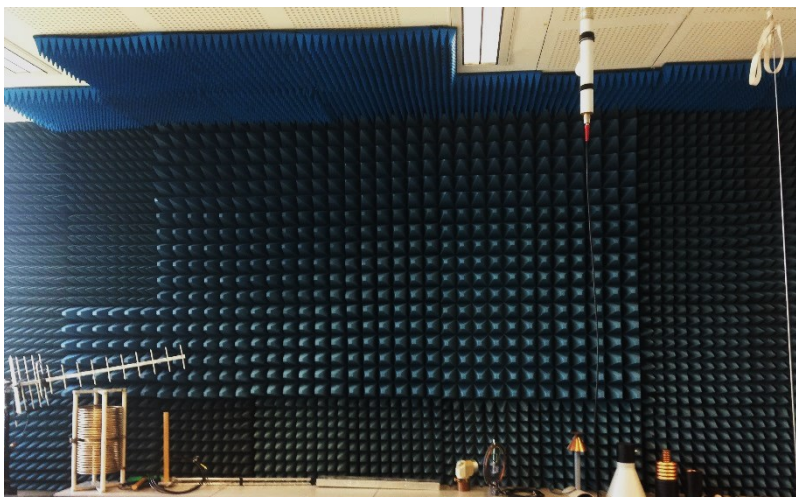
Obrázek 4.7: Kontrolní měření parametru PSV vyrobeného modelu č. 1



Obrázek 4.8: Kontrolní měření parametru PSV vyrobeného modelu č. 2



Obrázek 4.9: Kontrolní měření parametru PSV vyrobeného modelu č. 3



Obrázek 4.10: Bezodrazová stěna v laboratoři – stanoviště č. 2

4.3.2 Měření zisku reciproční metodou

Pro naměření zisku reciproční metodou potřebujeme dvě stejné neznámé antény. Jedna je připojena k VF generátoru jako vysílací a druhá k digitálnímu vektorovému analyzátoru. Ideálním prostředím pro měření zisku je homogenní prostředí s minimálními odrazy. Takovýchto požadovaných podmínek pro precizní přesnost měření dosáhneme v bezodrazových komorách, eventuálně existují tzv. absorpční boxy. Školní laboratoř obsahuje pouze bezodrazovou stěnu (viz stanoviště č. 2), do které byla přijímací anténa umístěna. Vzájemná vzdálenost antén d je dána minimálně trojnásobkem vlnové délky. Vzdálenost od země by měla být větší než dvojnásobek vlnové délky. Vysílací anténa byla připojena k signálovému generátoru od firmy Rohde&Schwarz typu SMB 100A. Ten disponuje kmitočtovým rozsahem 9 kHz až 3,2 GHz. Přijímací anténa byla zapojena na spektrální analyzátor značky Rohde&Schwarz typu FSH8 s rozsahem kmitočtu 9 kHz až 8 GHz. Výsledný zisk lze vypočítat několika způsoby. Ty se řídí dle upravené Friisovy radiokomunikační rovnice.

$$P_x = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - 2G_x \text{ [dB]} \quad (4.1)$$

$$G_x = 10 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right) - \frac{P_x}{2} \text{ [dBi]} \quad (4.2)$$

Kde G_x [dBi] je zisk dvou neznámých antén, P_x [dB] je výkonová úroveň signálu naměřená na neznámé anténě, d [m] je vzájemná vzdálenost dvou měřených antén a λ [m] je vypočtená pracovní vlnová délka λ_p (viz kap. 3).

Část této rovnice popisuje ztráty šířením v RF kanálu ve volném prostoru.

$$L_0 = 20 \log \left(\frac{4\pi d}{\lambda_p} \right) \text{ [dB]} \quad (4.3)$$

Vzdálenost mezi vysílací a přijímací stranou byla zvolena $d = 2,86 \text{ m}$, pracovní (mechanická) vlnová délka $\lambda_p = 0,081 \text{ m}$.

Po dosažení:

$$L_0 = 20 \times \log \left(\frac{4\pi \times 2,86}{0,081} \right) = \mathbf{52,94 \text{ dB}}$$

Celkový útlum trasy vyšel 52,94 dB. Výkonová úroveň na vstupu vysílací antény P_{TX} byla nastavena na 0 dBm. Úroveň naměřená přijímací anténou P_{RX} dosahovala hodnoty -37,8 dBm. Výsledný zisk lze odvodit tímto zjednodušeným způsobem:

$$P_{RX} = 2G + P_{TX} - L \text{ [dBm]} \quad (4.4)$$

$$G = \frac{P_{RX} - P_{TX} + L}{2} \text{ [dBi]} \quad (4.5)$$

$$G = \frac{-37,8 - 0 + 52,94}{2} = \mathbf{7,57 \text{ dBi}}$$

Softwarovou simulací zjištěný zisk modelu č. 1 dosahuje hodnoty 4,06 dBi. Naměřený zisk nabývá hodnoty 7,57 dBi. Naměřený zisk reálného modelu č. 1 je v porovnání se simulací téměř dvojnásobný.

Závěr

Úvodní kapitola seznamuje čtenáře se základní problematikou technologie RFID. Zaměřil jsem se na stručný popis historie a základní stavební koncepci. Spolu s rozdíly jsem popsal výhody a nevýhody RFID oproti jiným způsobům identifikace. Značnou část první kapitoly věnuji rozdělení tagů dle různých kritérií.

Následující kapitola je věnována obecné anténní problematice se zaměřením na popis klíčových parametrů společně s patřičným vysvětlením uvedených matematických vztahů. Poté poukazuji na provedení planárních mikropáskových antén, ze kterých vychází způsob návrhu reálné meandrové antény. Vysvětluji také rozdíl mezi dvěma možnými způsoby konstrukce meandrové antény. Umístění antény na dielektrický substrát totiž není jedinou cestou, jak meandrovou anténu navrhnout a sestavit. Zaměřuji se také na rozdíly mezi půlvlnným a meandrovaným dipólem. Závěr kapitoly se zabývá tištěnou variantou antény umístěnou na dielektrický substrát, dále pak problematikou impedančního přizpůsobení, připojení antény k napájecí a symetrizaci.

Hlavní náplní této diplomové práce byl praktický návrh meandrové antény pro zadaný kmitočet 2,45 GHz za účelem uplatnění v oblasti radiofrekvenční identifikace. Návrh meandrové antény byl realizován pomocí výpočtů a softwarové simulace v programu CST.

Základní motiv meandrové antény byl vytvořen intuitivní cestou s ohledem na mechanickou vlnovou délku 81,267 mm. Výsledný vzor modelu z CST je spolu se zvoleným způsobem napájení zobrazen na str. 40. Po provedení simulace byl z důvodu nepřizpůsobení na požadovaném kmitočtu nutný zásah do anténních rozměrů. Anténa si tedy prošla řadou úprav prostřednictvím ručních a následně automatických optimalizací. Největší vliv na impedanční přizpůsobení a hodnotu rezonančního kmitočtu měl parametr g_h (velikost zemnicí plochy) ze spodní strany antény. Poté se s velmi jemnými kroky upravovala velikost parametru λ a délka přizpůsobovacího pahýlku mikropásků bz . Optimalizací bylo dosaženo velmi precizního přizpůsobení všech tří modelů na požadovaném kmitočtu 2,45 GHz.

Testování vlivu substrátu bylo rozděleno do dvou fází. Nejprve byl testován materiál substrátu, posléze šířka a výška. Pro demonstrativní účely byl zvolen model č. 1, jenž dosahoval nejlepších výsledků simulací s nejvyšší přesností. Prostřednictvím simulací jsem dospěl k závěru, že celková velikost antény lze snížit případnou změnou délky L (v ose y) na hodnotu cca 7 cm. Anténa by na požadovaném kmitočtu byla stále použitelná a její zmenšení by umožnilo snazší integraci v případné aplikaci.

Poslední závěrečná kapitola se zabývá reálnou výrobou, kontrolním měřením a ověřením funkčnosti vyrobených antén. Výsledky měření reálných modelů dokazují, že prováděné simulace a výroba formou fotocesty byly velice přesné. Drobné odchylky naměřených hodnot od simulovaných jsou dle mého názoru způsobeny například ručním napájením konektorů. I nepatrně odlišná vrstva cínu by mohla způsobit rozladění a změnu vstupní impedance antény. Naměřený zisk modelu č. 1 7,57 dBi dokonce značně převýšil simulovanou hodnotu 4,06 dBi. Zhotovené

meandrové antény jsou plně schopny provozu na zadaném kmitočtu. Podstatné ilustrace jako jsou technický náčrt, náhled modelu z CST a vyhotovené modely jsou součástí tištěné přílohy. Zároveň jsou zde umístěny také grafy parametru S_{11} ze simulací a výsledné naměřené hodnoty reálných modelů. Doplnující grafy, diagramy, obrázky a fotodokumentace jsou umístěny v příloze na CD.

Použitá literatura

- [1] McCathie, L. *The advantages and disadvantages of barcodes and radio frequency identification in supply chain management* [online]. 2004 [cit. 2018-01-02]. Dostupné na: <http://ro.uow.edu.au/cgi/viewcontent.cgi?article=1009&context=thesesinfo>
- [2] Mehta, Tanvi. *CONVERT UHF RFID TAG FROM PASSIVE TO SEMI-PASSIVE TAG USING EXTERNAL POWER SOURCES* [online]. 2010 [cit. 2018-01-02]. Dostupné na: https://uta-ir.tdl.org/uta-ir/bitstream/handle/10106/5524/Mehta_uta_2502M_10921.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [3] Jechlitschek Christoph. *A Survey Paper on Radio Frequency IDentification (RFID) Trends* [online]. 2010 [cit. 2018-01-02]. Dostupné na: <https://www.cse.wustl.edu/~jain/cse574-06/ftp/rfid/index.html>
- [4] Della Vecchia, Gennaro, Esposito Massimo. *A Knowledge-Based Approach for Detecting Misuses in RFID Systems*. [online]. 2011 [cit. 2018-01-04]. Dostupné na: <https://www.intechopen.com/books/designing-and-deploying-rfid-applications/a-knowledge-based-approach-for-detecting-misuses-in-rfid-systems>
- [5] Finkenzeller Klaus. *RFID HANDBOOK Fundamentals and Applications in Contactless Smart Cards, Radio Frequency Identification and Near-Field Communication, Third Edition* [online]. 2010 [cit. 2018-01-08]. Dostupné ve formátu pdf na: http://aries.ektf.hu/~dream/e107/e107_files/downloads/rfidhand.pdf
- [6] Anonym. *Automated Access Control System Token Selection Guide* [online]. 2009 [cit. 2018-01-08]. Dostupné ve formátu pdf na: <https://www.cpni.gov.uk/system/files/documents/37/28/AACS-token-selection-guide.pdf>
- [7] Hervé, Aubert. *RFID Technology for Human Implant Devices* [online]. 2011 [cit. 2018-01-09]. Dostupné na: <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00599304/document>
- [8] Rotter, Paweł & Daskala, Barbara & Compañó, R. *RFID implants: Opportunities and challenges for identifying people* [online]. 2008 [cit. 2018-01-13]. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/3226936_RFID_implants_Opportunities_and_challenges_for_identifying_people
- [9] Harvey, Lehpamer. *RFID Design Principles: Components of the RFID System* [online]. 2012 [cit. 2018-01-13]. Dostupné ve formátu pdf na: http://cwu.unik.no/images/a/af/Components_of_the_RFID_System.pdf
- [10] M Ayoub Khan. Manoj Sharma. Brahmanandha Prabhu R. *A Survey of RFID Tags* [online]. 2009 [cit. 2018-01-17]. Dostupné ve formátu pdf na: <https://pdfs.semanticscholar.org/13bb/7d2238c674c7265e6a4f645e1d3a5b236b08.pdf>

- [12] Negar, Khast. *Overview of Radio Frequency Identification*. Helsinki. Bachelor Degree. Helsinki Metropoli. University of Applied Sciences. Telecommunications. [online]. 2017 [cit. 2018-01-17]. Dostupné v pdf na: <https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/131876/Final%20Thesis.pdf?sequence=1>
- [13] Vojáček, Antonín. *Používané RFID frekvence a jejich vliv na čtení a zápis tagu* [online]. 2015 [cit. 2018-02-02]. Dostupné na: <https://automatizace.hw.cz/komponenty-prumyslove-sbornice-a-komunikace/vice-i-mene-bezne-rfid-frekvence-a-jejich-vliv-na-vlastnosti-tagu.html>
- [14] Sviták, Petr. *Semiaktivní RFID UHF TAG s generátorem náhodných čísel*. Praha. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Výpočetní a informační centrum. [online]. 2017 [cit. 2018-02-02]. Dostupné na: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/68458?show=full>
- [15] White, Gareth & Gardiner, Georgina & Prabhakar, Guru & Abd Razak, Azley. A *Comparison of Barcoding and RFID Technologies in Practice*. *Journal of Information Information Technology and Organizations* [online]. 2007 [cit. 2018-02-03]. Dostupné ve formátu pdf na: http://eprints.uwe.ac.uk/13460/1/Barcode_and_RFID.pdf.
- [16] Knežević, Blaženka, Delić, Mia, Cegnar, Matija. *BENEFITS AND RISKS OF RFID TECHNOLOGY IN RETAIL FROM THE YOUNGER CONSUMERS' POINT OF VIEW*. [online]. 2015 [cit. 2018-02-03]. Dostupné na: <https://hrcak.srce.hr/ojs/index.php/plusm/article/view/3871/2258>
- [17] Sommerová, Martina. *Základy RFID technologií, výukový materiál* [online]. [cit. 2018-02-03]. Dostupné na: <http://docplayer.cz/3689532-Zaklady-rfid-technologiei.html>
- [18] Dvorský, Marek. *Základy bezdrátových komunikací II pro integrovanou výuku VUT a VŠB-TUO*, 2014, [cit. 2018-03-10].
- [19] ČESKÝ, Tomáš. *Antény pro příjem televize*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1985. [cit. 2018-03-05].
- [20] Pilný Roman, *Zisk a směrová charakteristika* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné na: <http://www.rc-eagleeye.cz/rc-eagleeye/0/0/2/93>
- [21] Chmiel, Michal. *Návrh a realizace Hovermanovy antény* [online]. Ostrava, 2016. Bakalářská práce [cit. 2018-04-01].
- [22] Jordan, Karel. *Přednášky z amatérské radiotechniky – Antény* [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné v pdf na: <http://om6bb.bab.sk/files/HAM%20Kniznica/Prednasky/Gumickova/Gumickova%202-4.PDF>
- [23] Anonym. *Antenna – Theory, S-parameters*, c2008-2015, [online]. [cit. 2018-03-05]. Dostupné na: <http://www.antenna-theory.com/definitions/sparameters.php>

- [24] Procházka, M. *Antény: Encyklopedická příručka*. 3., rozš. Vyd. Praha: BEN – technická literatura, 2005, 383 s. ISBN 80-7300-166-7. [cit. 2018-03-06].
- [25] Constantine A. Balanis. *ANTENNA THEORY ANALYSIS AND DESIGN THIRD EDITION*. [online]. 2005 [cit. 2018-02-10]. Dostupné v pdf na: <https://archive.org/details/Antenna.Theory.Analysis.and.Design3rd.Edition>
- [26] THOMAS A. MILLIGAN. *MODERN ANTENNA DESIGN-Second Edition* [online]. 2005 [cit. 2018-02-11]. Dostupné na: <http://www.radio-astronomy.org/library/Antenna-design.pdf>
- [27] Mehta, Anuj. *Microstrip Antenna* [online]. 2015 [cit. 2018-02-11]. Dostupné na: https://www.researchgate.net/publication/276165361_Microstrip_Antenna
- [28] Polívka, Milan. *Mikropáskové antény* [online] 2014 [cit. 2018-02-11]. Dostupné na: http://old.elmag.org/sites/default/files/ppt/01_mikropaskove_anteny_a0m17NKA_2013.pdf
- [29] Gurpreet Kaur, Er. Sonia Goyal. *To Study the Effect of Substrate Material for Microstrip Patch Antenna*. [online]. 2013 [cit. 2018-02-13]. Dostupné v pdf na: <http://www.ijettjournal.org/2016/volume-36/number-9/IJETT-V36P289.pdf>
- [30] Nakauchi, Ed. *ELECTRONIC DESIGN - 11 Myths About EMI/EMC* [online]. 2016 [cit. 2018-02-13]. Dostupné v pdf : <http://www.electronicdesign.com/test-measurement/11-myths-about-emiemc>
- [31] Ma, MinJie, Deng, Kai. *THE STUDY AND IMPLEMENTATION OF MEANDER-LINE ANTENNA FOR AN INTEGRATED TRANSCEIVER DESIGN* [online]. 2010 [cit. 2018-02-13]. Dostupné v pdf na: <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:476979/FULLTEXT01.pdf>
- [32] LAHEURTE, Jean-Marc, Christian RIPOLL, Dominique PARET, Christophe LOUSSERT. *UHF RFID technologies for identification and traceability* [cit. 2018-02-13]. 2014. ISBN 978-1-84821-592-4.
- [33] Tondare, Shivshankar. *Meander Line Antenna for LTE Communications* [online]. 2014 [cit. 2018-02-13]. Dostupné v pdf na: <http://www.ijritcc.org/download/Meander%20Line%20Antenna%20for%20LTE%20Communications.pdf>
- [34] O. O. Olaode, W. D. Palmer and W. T. Joines. *Characterization of Meander Dipole Antennas With a Geometry-Based, Frequency-Independent Lumped Element Model*, in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 11, pp. 346-349, 2012. [online]. [cit. 2018-02-25]. Dostupné v pdf na: <http://www.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a571344.pdf>
- [35] Preradović, Stevan. *Advanced Radio Frequency Identification Design and Applications* 2011 ISBN 978-953-307-168-8 [cit. 2018-02-25].

Seznam příloh

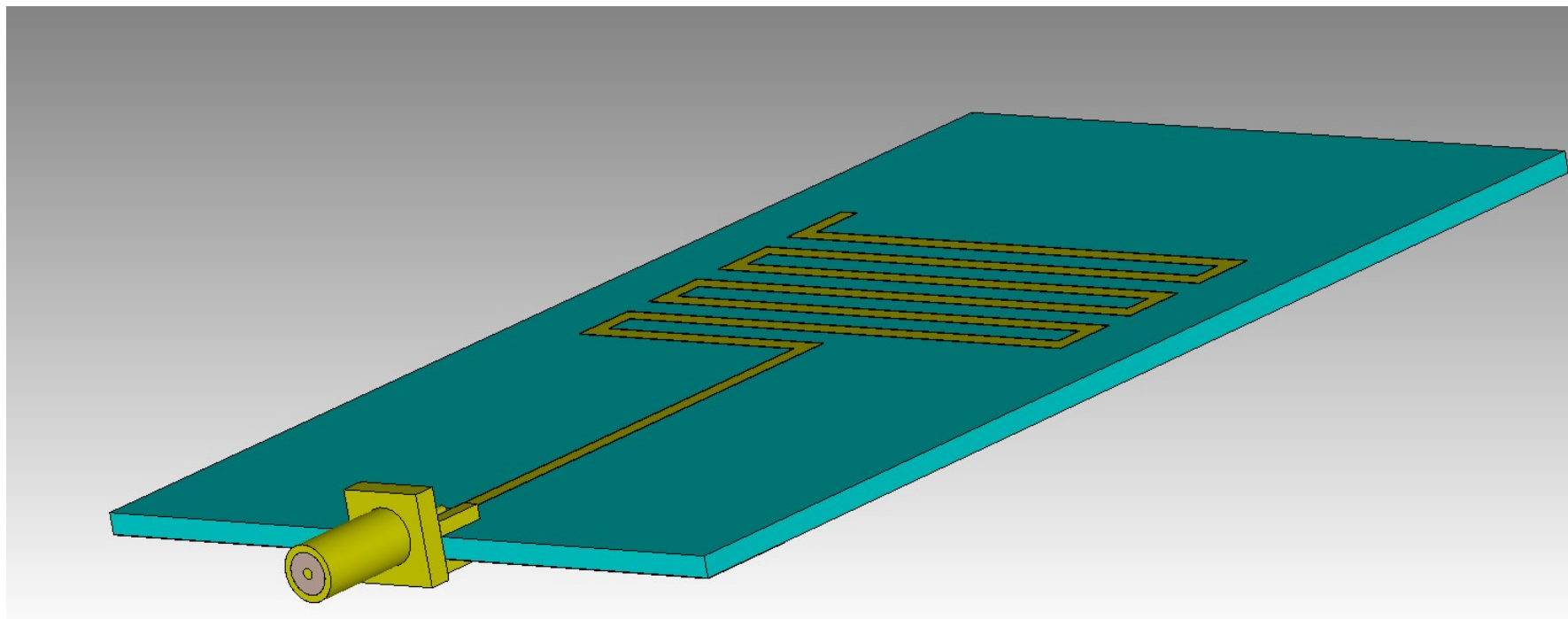
Příloha A: Technický náčrt modelu č. 1 meandrové antény	I
Příloha B: Boční náhled modelu č. 1 - simulace	II
Příloha C: Graf parametru S_{11} prvotního návrhu meandrové antény před optimalizací – simulace III	
Příloha D: Graf parametru S_{11} návrhu meandrové antény po optimalizacích – simulace – úprava v programu MATLAB	IV
Příloha E: Náhled měřicího pracoviště – stanoviště č. 1	V
Příloha F: Graf parametru S_{11} reálného modelu č. 1 – měření	VI
Příloha G: Graf parametru S_{11} reálného modelu č. 2 – měření	VII
Příloha H: Graf parametru S_{11} reálného modelu č. 3 – měření	VIII
Příloha I: Náhled Smithova diagramu pro model č. 1 – měření	IX
Příloha J: Materiál ASTRA MT 77- Směrová charakteristika a) horizontální b) vertikální – simulace X	
Příloha K: Vliv změny šířky substrátu ASTRA MT77 na směrovou charakteristiku – simulace	XI
Příloha L: Vliv změny výšky substrátu ASTRA MT77 na směrovou charakteristiku – simulace XII	
Příloha M: Označení jednotlivých vyrobených modelů – výroba	XIII

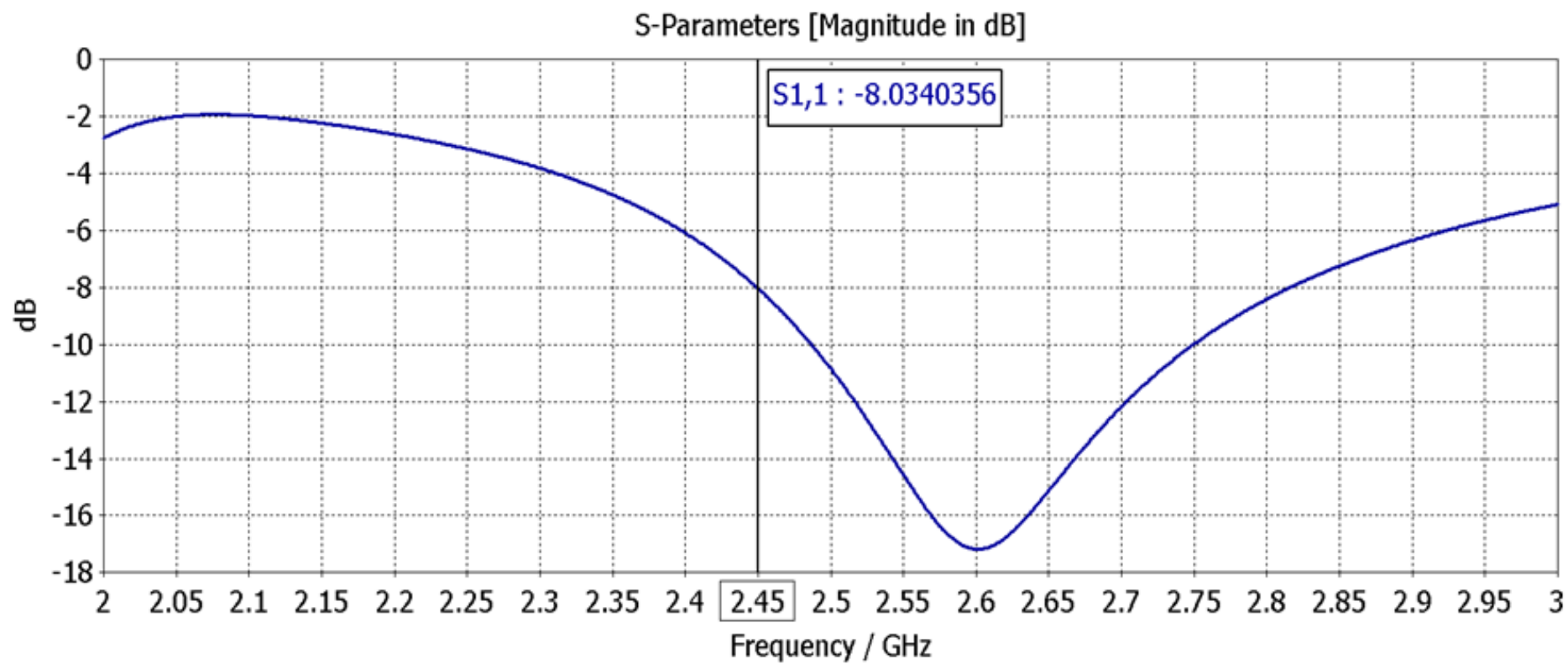
Součástí DP je CD/DVD.

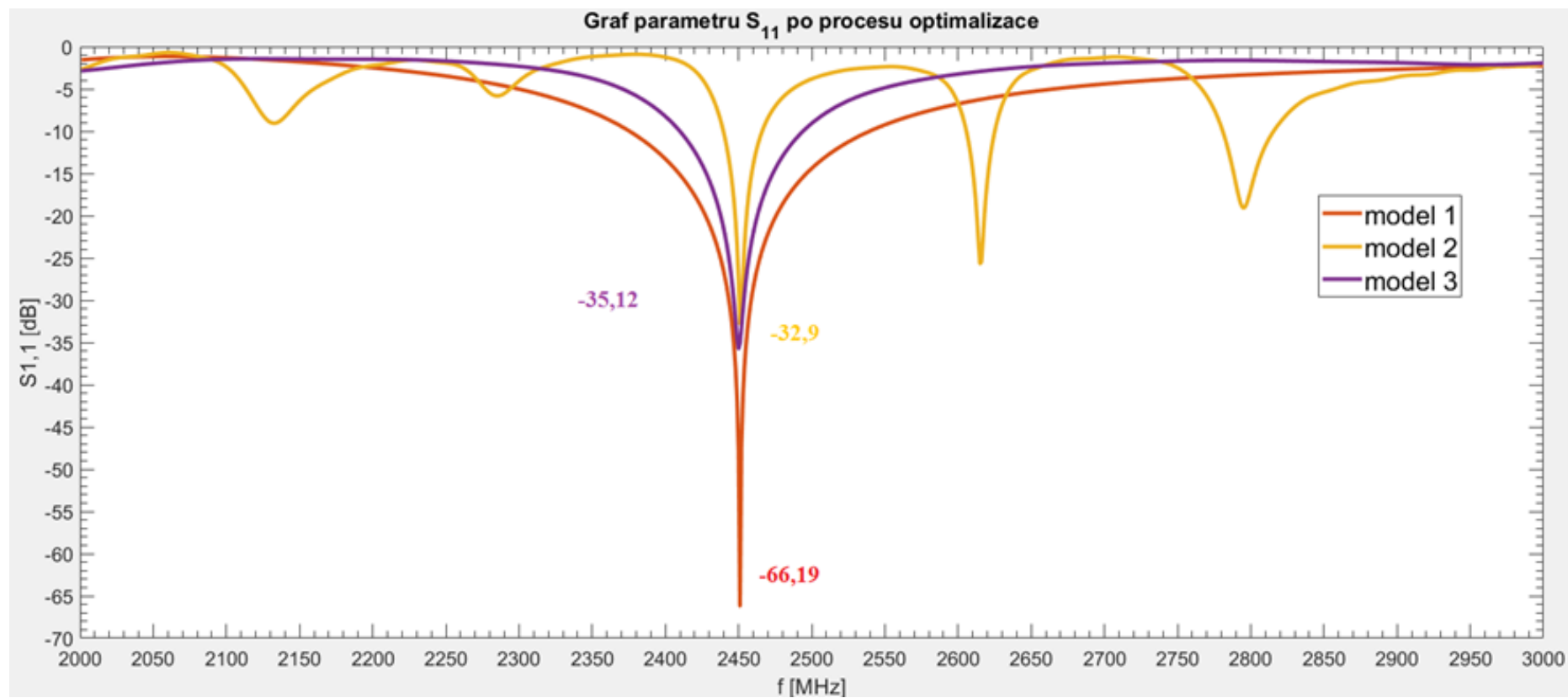
Obsah přiloženého CD/DVD:

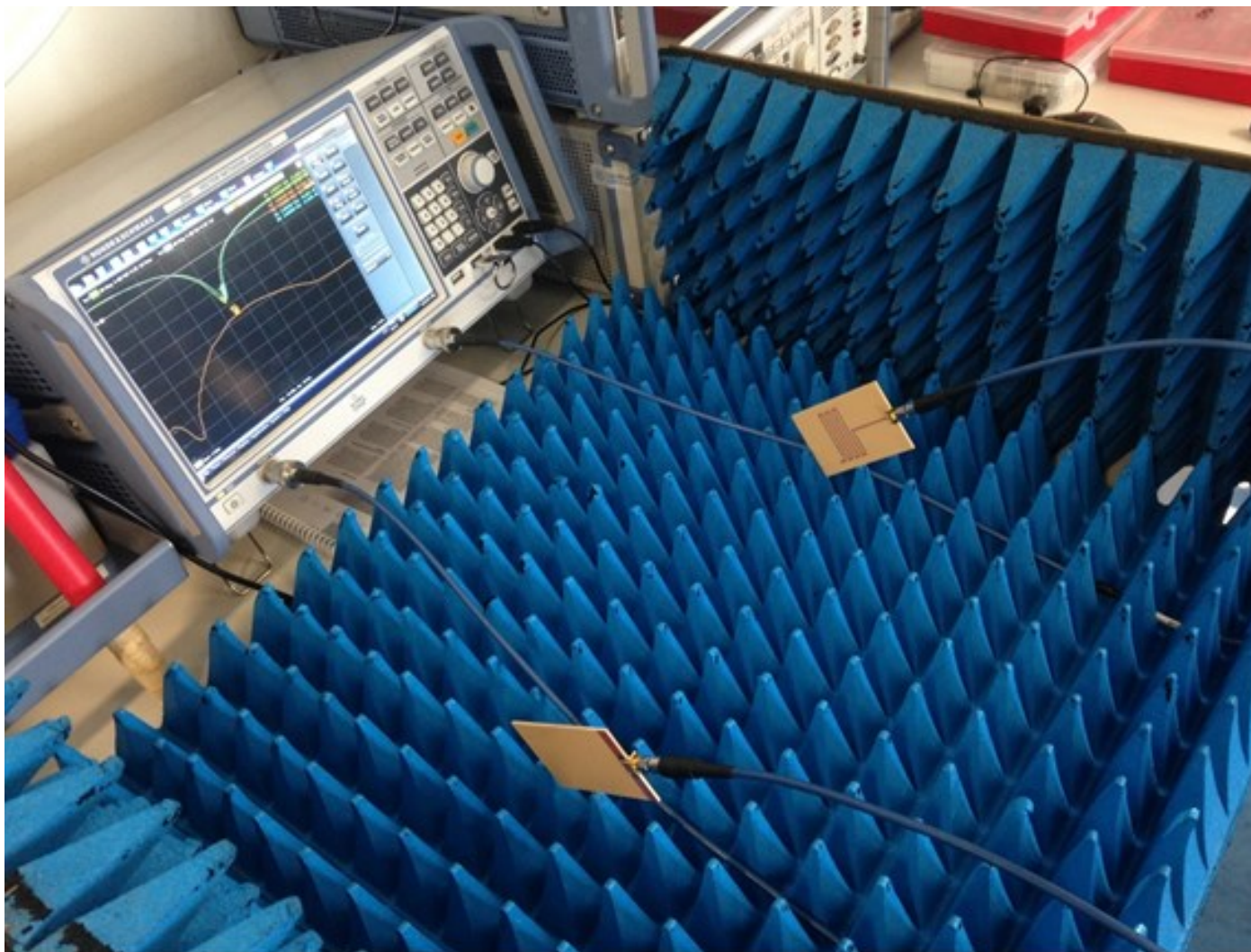
1. "CD-ROM":\Priloha_1\Simulace
2. "CD-ROM":\Priloha_2\Simulace_vliv_substratu
3. "CD-ROM":\Priloha_3\Fotodokumentace
4. "CD-ROM":\Priloha_4\Obrazky
5. "CD-ROM":\Priloha_5\Export_Firma
6. "CD-ROM":\Priloha_6\Mereni
7. "CD-ROM":\Priloha_7\Soubory_MATLAB

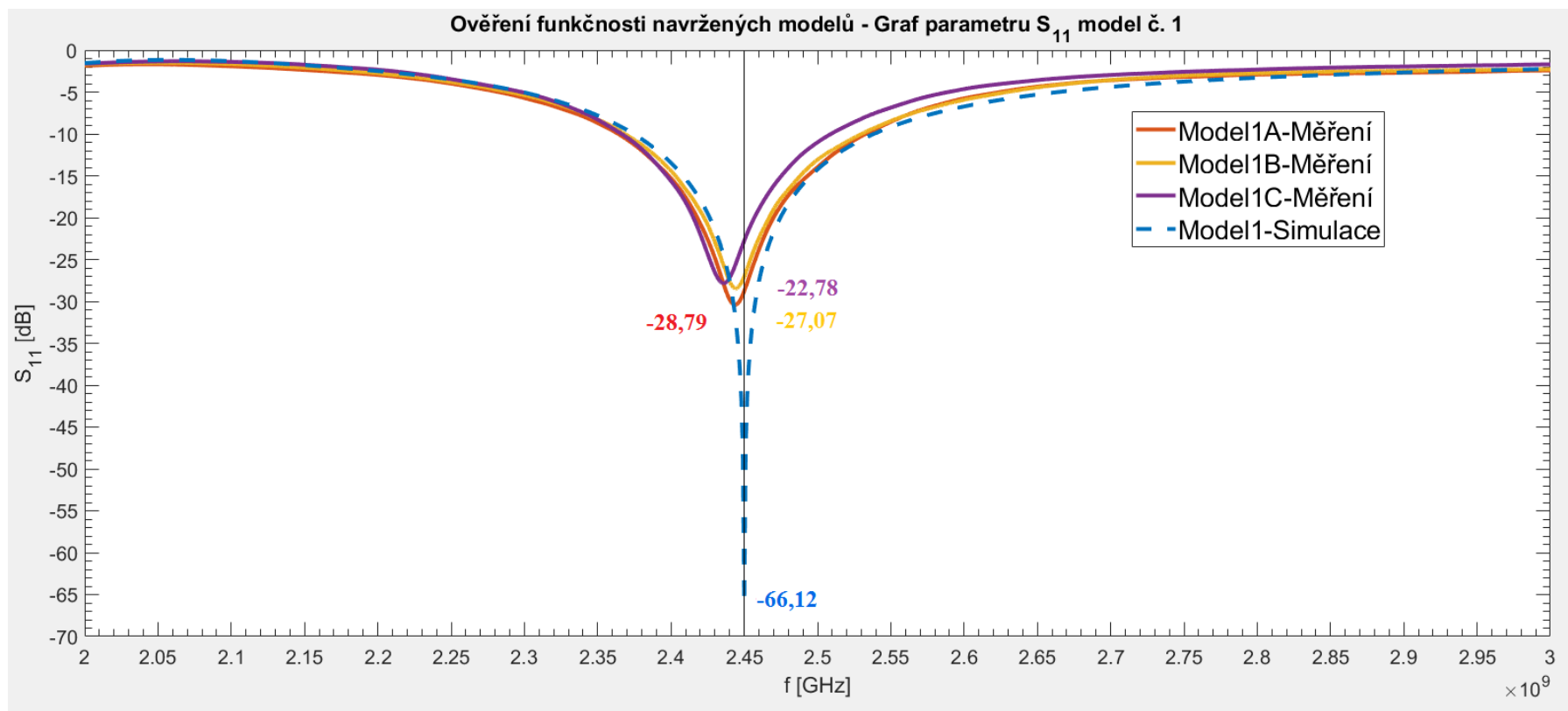


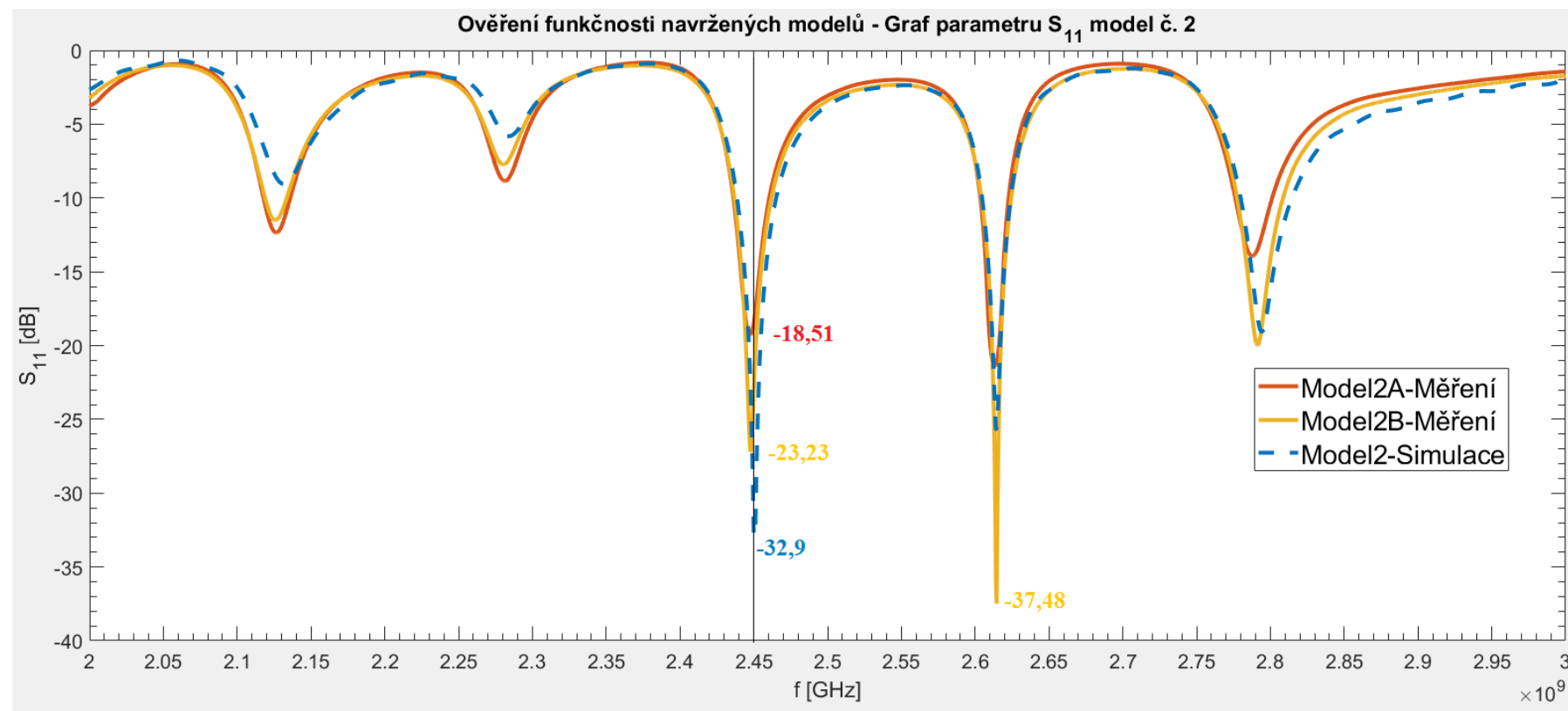


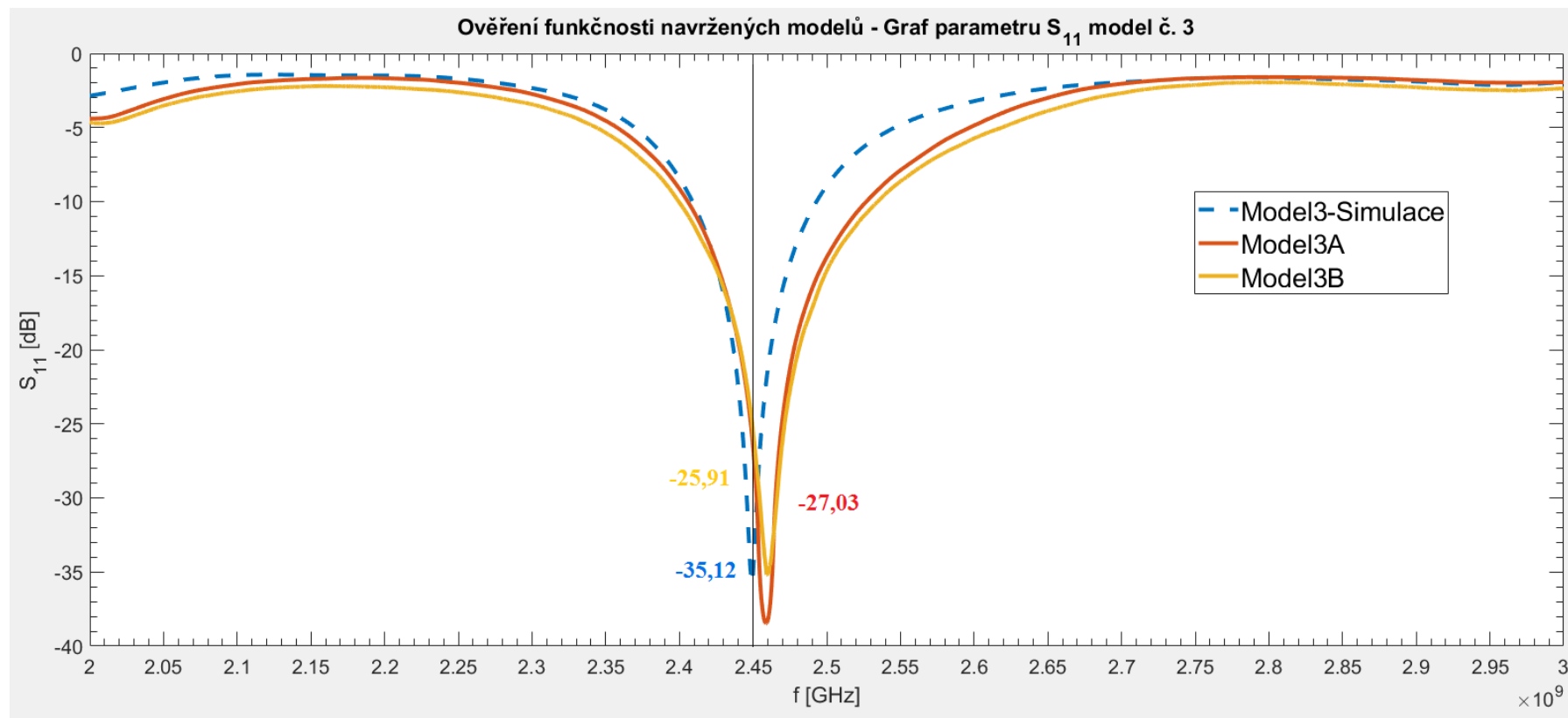


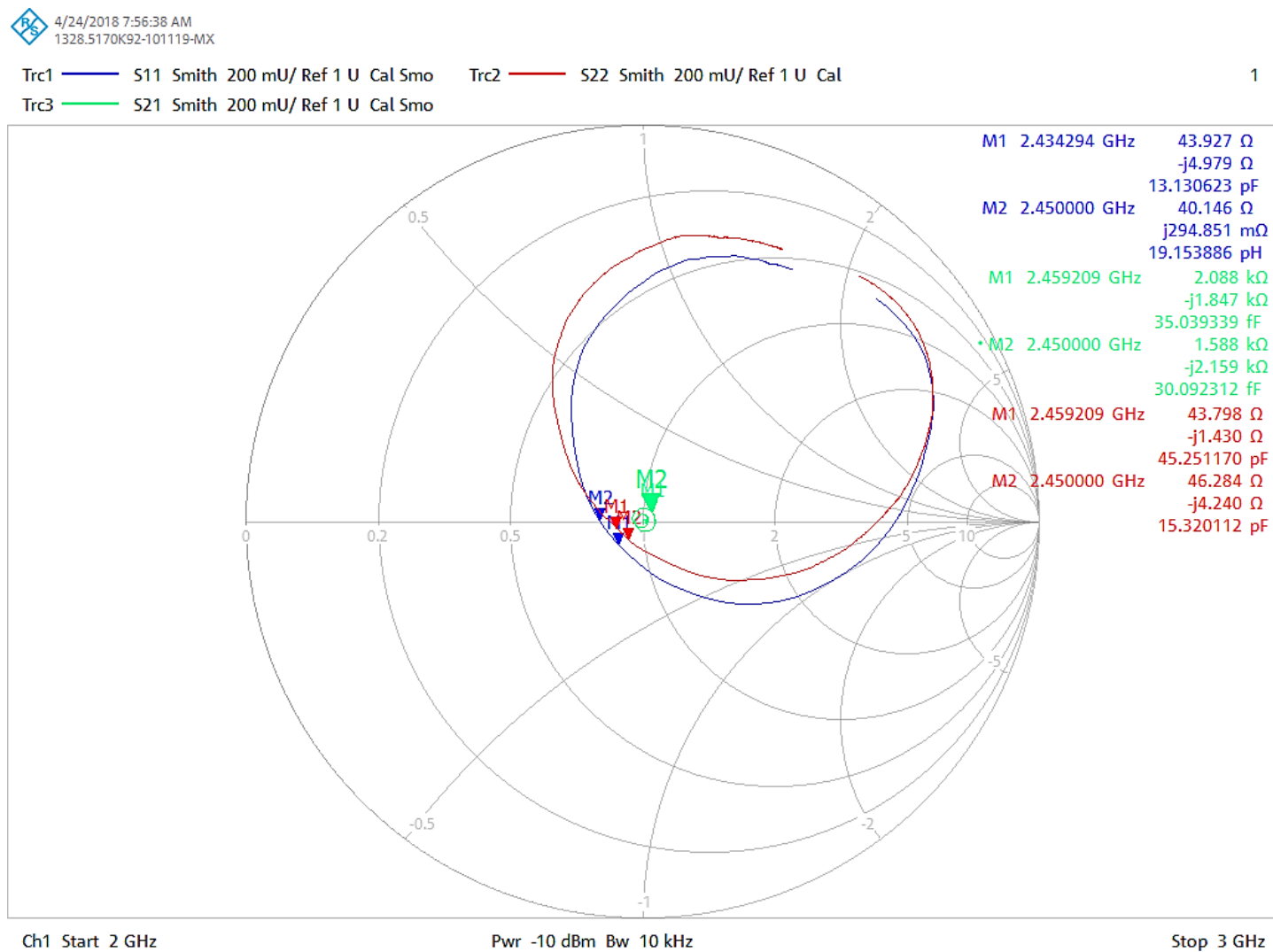




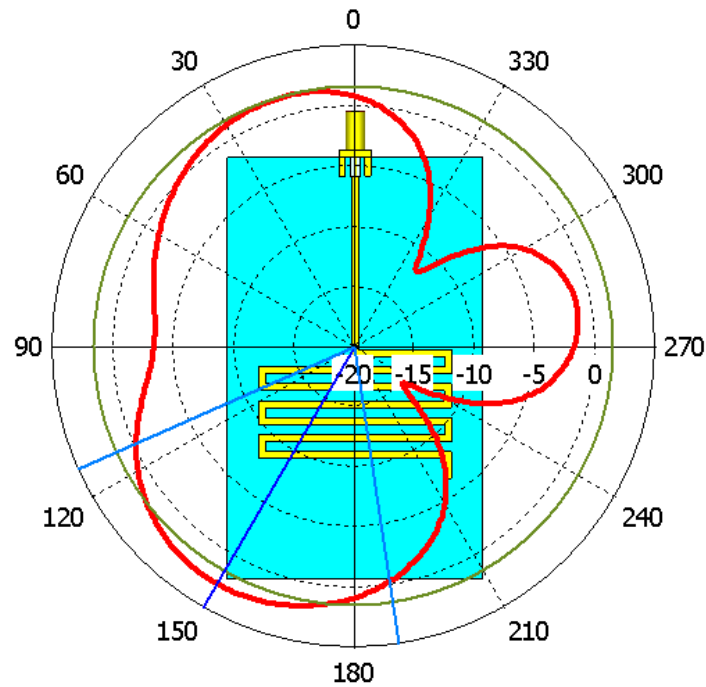
Příloha F: Graf parametru S_{11} reálného modelu č. 1 – měření





Příloha I: *Náhled Smithova diagramu pro model č. 1 – měření*

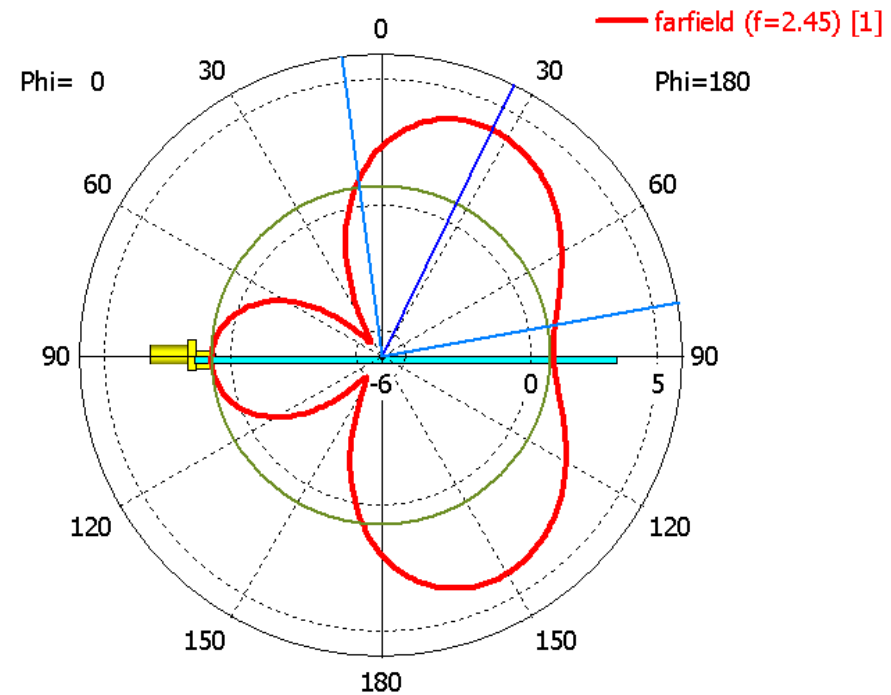
a) Farfield Directivity Abs (Theta=90)



Phi / Degree vs. dBi

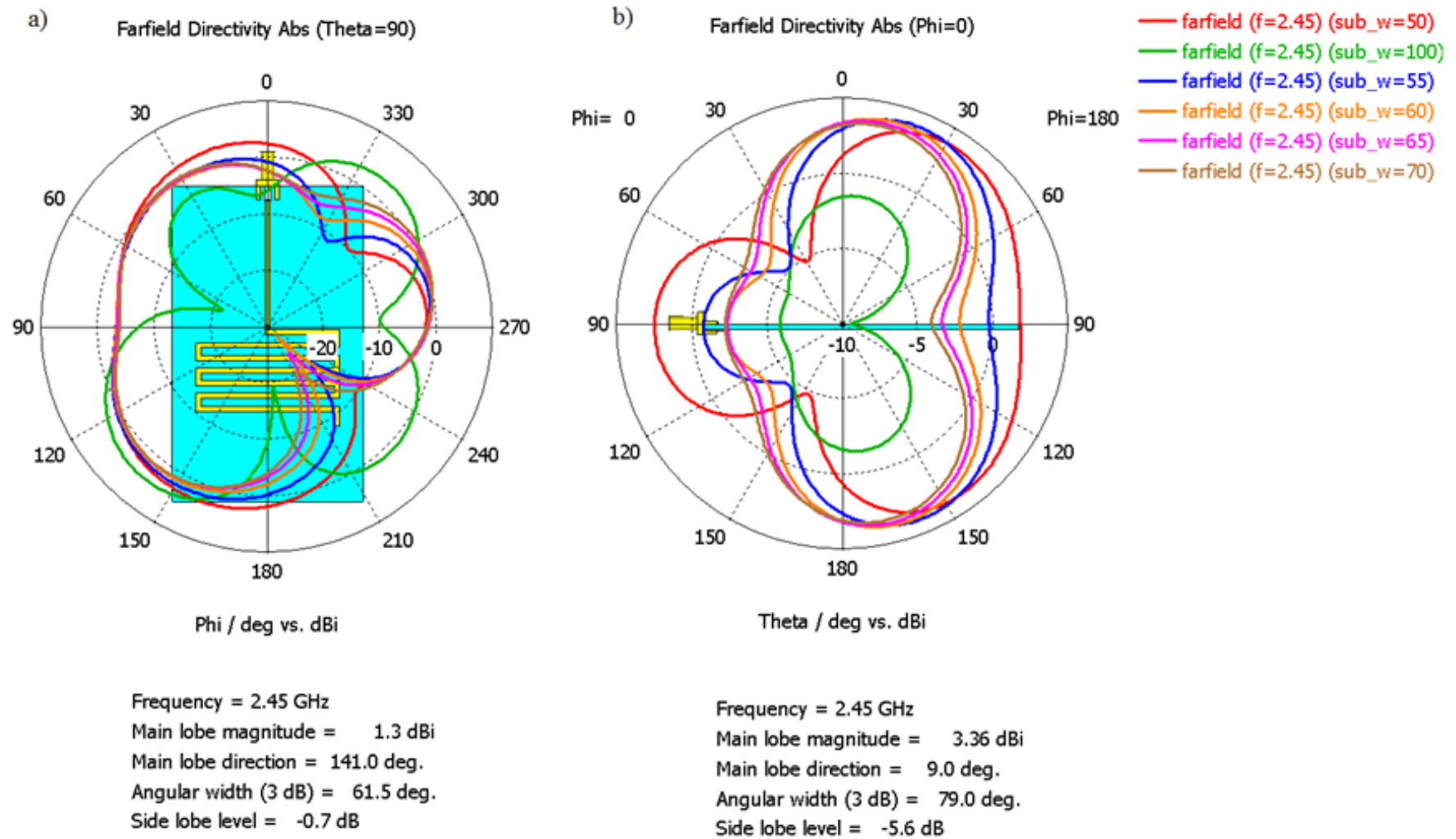
Frequency = 2.45 GHz
Main lobe magnitude = 2.69 dBi
Main lobe direction = 150.0 deg.
Angular width (3 dB) = 74.7 deg.
Side lobe level = -1.2 dB

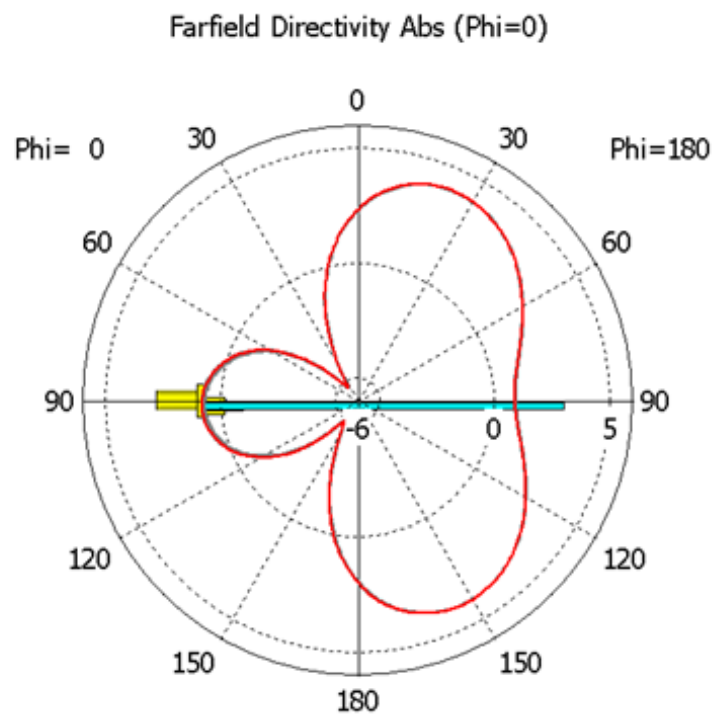
b) Farfield Directivity Abs (Phi=0)



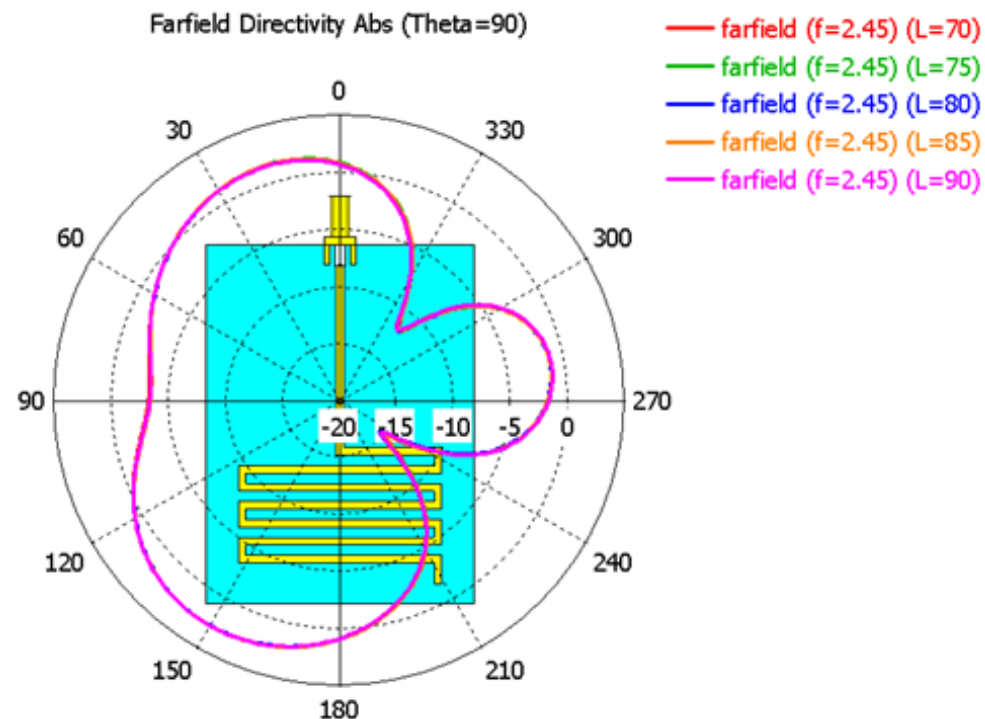
Theta / Degree vs. dBi

Frequency = 2.45 GHz
Main lobe magnitude = 4.02 dBi
Main lobe direction = 26.0 deg.
Angular width (3 dB) = 87.4 deg.
Side lobe level = -3.3 dB





Frequency = 2.45 GHz
 Main lobe magnitude = 4.03 dBi
 Main lobe direction = 26.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 86.9 deg.
 Side lobe level = -3.4 dB



Frequency = 2.45 GHz
 Main lobe magnitude = 2.7 dBi
 Main lobe direction = 149.0 deg.
 Angular width (3 dB) = 74.5 deg.
 Side lobe level = -1.3 dB

